大学素质教育通识课系列教材

文科物理十五讲

吴宗汉　编著

北京大学出版社

大学素质教育通识课系列教材

精选名校名牌课程
100种，内容涵盖
文、史、哲、艺术、社会科学和自然科学
来自16所重点大学的重量级学者
深入浅出传授各门学科知识，让更多的学子
亲炙名师教泽
拓展学术眼光
增益人格素养
是大学素质教育的优选教材
也是高品位的学科普及读物

ISBN 7-301-06495-0



责任编辑：顾卫宇
封面设计：林胜利

ISBN 7-301-06495-0/O·0574
定价：29.00元

大学素质教育通识课系列教材

文科物理十五讲

吴宗汉　编著

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

文科物理十五讲/吴宗汉编著.—北京:北京大学出版社,2004.1
(大学素质教育通识课系列教材)
ISBN 7-301-06495-0

Ⅰ.文…　Ⅱ.吴…　Ⅲ.物理学-高等学校-教材
Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 075208 号

书　　　名:文科物理十五讲
著作责任者:吴宗汉　编著
责 任 编 辑:顾卫宇
标 准 书 号:ISBN 7-301-06495-0/O·0574
出 版 发 行:北京大学出版社
地　　　址:北京市海淀区中关村 北京大学校内　100871
网　　　址:http://cbs.pku.edu.cn
电 子 信 箱:zpup@pup.pku.edu.cn
电　　　话:邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021
排　版　者:北京高新特打字服务社　51736661
印　刷　者:北京大学印刷厂
经　销　者:新华书店
890 毫米×1240 毫米　A5　18.625 印张　480 千字
2004 年 1 月第 1 版　2004 年 1 月第 1 次印刷
定　　　价:29.00 元

《大学素质教育通识课系列教材》编审委员会

《大学素质教育通识课系列教材》
总　　序

本系列教材编审委员会

《大学素质教育通识课系列教材》是由北京大学发起，全国16所重点大学和一些科研单位协作编写的一套大型教材。全套计划出版100种，涵盖文、史、哲、艺术、社会科学、自然科学等各个主要学科领域，第一批42种在2003年内出版。北京大学校长许智宏院士出任这套教材的编审委员会主任，北大中文系主任温儒敏教授任执行主编，来自全国的五十多位各学科领域的权威学者主持各专题教材的撰写。目前为止，这是国内通识类大学教材中学科覆盖面最广、规模最大、编撰者阵容最强的一套教材。

本系列教材有明确的定位，那就是适应新世纪的大学生所要求的"通识"。这是为配合高校推进素质教育和学分制改革而设计的，是大学本科的教科书；同时又是高品位的学科普及读物，能够满足社会上各类读者获取知识与提高素养的需求。

素质教育正成为当今大学教育的趋势。为培养学生健全的人格，拓展与完善学生的知识结构，造就更多有创新潜能的复合型人才，目前全国许多大学都在调整课程，推行学分制改革，改变本科教学以往比较单纯的专业培养模式。多数大学的本科教学计划中，都已经规定和设计了"通识课"(有的学校称之为"全校性通选课"或"公选课")的内容与学分比例，要求学生在完成本专业课程之外，选修一定比例的外专业的课程，包括供全校选修的"通识课"。如清华、北大规定所有的理工科学生必须选修

一定学分的外专业课程和属于通识修养范围的公共课程，其中又规定，人文艺术类课程和社会科学类课程必须占有相当的比例；同样，文科的学生也必须选修一定学分比例的理科课程。在北京大学，每学年开设的面向全校的“通识课”就有七八十门，几乎涉及文理科所有主要的领域。但是，从调查的情况看，许多学校虽然在努力建设通识课，也还存在一些困难和问题：主要是缺少统一的规划，到底应该有哪些基本的通识课，缺少通盘的考虑；课程不正规，没有相对的稳定性，往往因人设课，或者以一般性的讲座代替上课；课量不足，学生缺少选择的空间；更普遍的问题是，很少有真正适合通识教育的教材，有的只好用专业教材替代，影响了教学的效果。一般说来，综合性大学这方面的情况稍好，其他普通的大学，特别是理、工、医、农类学校因为相对缺少这方面的教学资源，加上没有可供选择的教材，开设通识课的困难就更大。

这些年来，各地也陆续出版过一些面向素质教育的教材，但无论质量还是数量，都还远远不能满足需要。到底应当如何建设好通识课，使之真正能纳入正常的教学系统，并达到较好的教学效果？是许多学校的师生普遍关心的问题。从2000年开始，由北大中文系主任温儒敏教授发起，联合了本校和一些兄弟院校的老师，经过广泛的调查，并征求许多院校“通识课”主讲教师的意见，提出要策划一套“大学素质教育通识课系列教材”。这项建议得到北京大学校长许智宏院士的支持，并由他牵头，组成了一个在学术界和教育界都非常有影响力的教材编审委员会，实际上也就是有效地联合了全国许多重点大学，协力同心来做成这套大型的系列教材。北京大学出版社历来以出版高质量的大学教科书闻名，由北大出版社承担这样一套多学科的大型系列教材的出版任务，也顺理成章。编写出版这套教材的目标是明确的，那就是：

充分整合和利用全国各相关学科的教学资源，通过系列教材的编写、出版和推广，将素质教育的理念贯彻到通识课知识体

系和教学方式中，使这一类课程的学科搭配结构更合理，更正规，更具有系统性和开放性，从而也更方便全国各大学设计和安排这一类课程。

2001年底，这套通识课系列教材的第一批课题确定，共42种。选题的确定，主要是考虑大学生素质教育和知识结构的需要，也参考了一些重点大学的相关课程安排。课题的酝酿和作者的聘请反复征求过各学科专家以及教育部各学科教学指导委员会的意见，并直接得到许多大学和科研机构的支持。第一批选题的作者当中，有一部分就是由各大学推荐的，他们已经在所属学校成功地开设过相关的通识课程。令人感动的是，虽然受聘的作者大都是各学科领域的顶尖学者，不少还是学科带头人，科研与教学工作本来就很忙，但多数作者还是非常乐于接受聘请，宁可先放下其他工作，也要挤时间保证这套书的完成。学者们如此关心和积极参与素质教育之大业，应当对他们表示崇高的敬意。

这套系列教材的内容和形式都充分考虑到通识课教学的特点。我们注意到通识课既然是一种课程，就不能等同于一般的讲座，要有一定的知识系统，有相对独立的学科范围和专业性，但又不能讲成专业课，也不能只是将专业课压缩或简化。重要的是能适合本专业之外的一般大学生，深入浅出地传授相关学科的知识，扩展学术的胸襟和眼光，进而增益学生的人格素养。编写这类教材要能入乎其内，出乎其外，把学问真正做活了，其难度不下于写专著。因此对这套教材作者的要求很高。所幸我们所邀请的大都是那些真正有学术建树，有良好的教学经验，又能将学问深入浅出地传达的重量级学者，是“大家”讲“通识”，质量是有保证的。本系列教材策划的意图就是要精选名校名牌课程，实现各大学教学资源共享，让更多的学子能够通过这套教材，亲炙名家名师课堂。希望能从各大学继续物色那些受学生欢迎、已经比较成型的通识课教材（或讲稿），加盟本教材系列。下面，再就本教材的特色与使用，做几点说明：

这套系列教材的每一本都是根据通识课的课时和授课对象的特点，设计为15讲，正好讲一个学期，大约也就是15次，每周一次2课时。

本系列教材主要是供全校性选修课使用的，拟想读者就是一般大学本科的学生，充分考虑到"通识"的特点，不是简单的专业课的缩写版，但又区别于坊间一般的流行科普读物。

本系列教材符合教学的基本要求，讲求知识的相对稳定性，有一定的系统，重点突出，内容和章节明晰，深入浅出，又能适当接触学科前沿，引发不同专业学生的跨学科思考和学习的兴趣。

本系列教材大都有意采用"学术讲座"的风格，适当保留讲课的口气和生动的文风，有"讲"的现场感，比较亲切、有趣，有可读性，更适合通识教学，同时也更能吸引社会上的一般读者。

为便于教学，教材的每一讲要求设计有思考题、知识点和适合非本专业扩展阅读的基本参考书目。

建议各大学开设通识课时，指定学生选用和阅读本系列教材中相关的教材，教员上课可以参照采用本教材的框架和基本内容，再加补充发挥；或者预先指定学生阅读本教材与相关的材料，上课时组织学生专题讨论；也可以把本教材作为参考教材。

本系列教材的出版也许只是提供探讨通识课教学的一个平台。若条件容许，本教材编审委员会和北大出版社可以围绕教材使用和教学方法的研讨，组织相应的教学培训研讨班。

本系列教材每一本的书名一律冠以"十五讲"，有意形成一种系列出版物鲜明的特色，一种图书品牌。

当然，我们更希望这套教材的出版能有效地促进全国各大学的素质教育和通识课的建设，从而联合更多的学界同仁，一起来努力营造一项宏大的文化教育工程。

前　言

随着科技的发展、社会的进步、经济的腾飞，世界上许多重大问题和复杂事件都显示出对文、理结合人才的越来越迫切的需求。这样也就促使了文、理互渗和学科交叉的急激发展。文科向理科渗透是较为顺利的，而理科向文科的渗透、交叉和发展却困难重重，其进展不能尽如人意。对此，人们往往只囿于以人材培养上存在基础的差异这一点上去思考，而忽视从现代文化发展中的隔阂和冲突的高度上来认识。这正如已故著名物理学家吴健雄博士曾指出的：为了避免出现社会可持续发展中的危机，当前一个刻不容缓的问题是消除现代文化中两种文化——科学文化和人文文化——之间的隔阂，而为加强这两方面的交流和联系，没有比大学更适合的场所了。只有当两种文化的隔阂在大学校园里加以弥合之后，我们才能对世界给出连贯而令人信服的描述。

因此，在大学中对文科大学生开设大学物理也正是消除两种文化隔阂的有效举措之一。北京大学出版社规划出版包括本书在内的《大学素质教育通识课系列教材》应该是一个有识之举。

在编写中，作者力图避免将本书写成是压缩饼干式的或科普式的知识介绍。我认为文科物理不应包罗理工科大学物理的全部内容，而应在保持物理体系的相对完整的前提下，删减大量仅仅是技术意义上的内容，在这方面我很赞同下列的说法，即："物理学科的发展经历了两个时期：从质点运动和波动这两个极

限来反复研究热、光、声、电、磁等效应的经典物理和解释了原子内部结构及波粒二象性的近代物理。”(唐有祺语)为此,本教材很强调要打牢力学部分的基础。因为这样才能学好其他部分的内容。但这也容易造成对反映当代物理及前沿发展的介绍不足,以及对物理学研究方法论不加深入讨论。本教材注意并兼顾了这些问题,除列专讲讨论方法外,还以21世纪科技界的几大重要支柱为中心做了介绍。

作为教材也相应增加了不少思考性强、趣味性强、可读性更强的问题和思考题。

综上所述,文科大学物理教材的编写,其内涵深远,绝非仅是出版一两本具体教材的问题。

本书的编写,自始至终得到了北京大学温儒敏教授、顾卫宇编辑等人的大力支持和鼓励,在此特致谢;金韵韵同学为本书补画了部分插图,亦一并致谢。

限于编者水平,错误不当之处,请诸位不吝赐教。

吴宗汉

于石头城下

目　录

第一讲　人类在宇宙中的位置

1.1　人类在宇宙空间中的位置

1.1.1　速率法测量距离

物体有多大？离我们有多远？这是我们经常碰到的问题。日常生活中所接触到的东西，人们能够立刻感觉到它们的大小，肉眼能大体估计出它们的远近。精确一点用尺去量，这样一些简单的方法就可以有结果。但对更大、更远的东西，如高山、大漠，就必须用更有效的方法来确定其大小和距离。一种方法就是用速率来测量。例如，汽车每小时行驶 100 公里(km)，从甲地行驶到某一地点需 5 小时(h)，我们就知道某地距甲地为 500 km。如按时速 100 km/h 绕大漠一周，费时 32 h，则大漠的周长为 3200 km。同样，用速率可以测量地球的大小。飞机飞行 100 km 约需 10 分钟(min)，若在两海岸之间飞行一次约需 500 min，则两海岸间的宽度约为 5000 km。同样一架飞机绕地球一周，几乎需要它的 10 倍的时间，于是地球的圆周大约为 50 000 km(实际是 40 000 km)。我们设想，地球是个圆球，这样就容易从它的圆周算出直径 13 000 km。这就是人类自己的住所——地球这个行星的大小。

1.1.2　反射法测量距离

为了显示出人类在宇宙中的位置，让我们把视野扩大到宇宙空间中的许多星体，它们距地球是很遥远的。先考虑月亮、太阳和太阳系中的星星，如何测量它们与地球之间的距离呢？最简单的方法是根据雷达技术发展出来的一个方法。即把雷达束

对准目标月亮，并发出一个短脉冲信号，等候雷达所发出的信号从目标月亮上反射回来，测量出信号往返所需的时间间隔是2.6秒(s)，即雷达信号从地球到达月亮，再从月亮回到地球，历时2.6 s。雷达波与光波一样，都有同样的速率——300 000 km/s。于是我们得出结论：地球—月亮—地球的距离是2.6×300 000 km，这就告诉我们，月亮离地球大约400 000 km。当然，反射法也是利用速率来测量距离的。

知道了地球到月亮的距离，那要问，月亮有多大呢？我们看到的月亮像个圆盘。把同月亮一样大的圆盘从地平线西端挨个儿摆到天顶，再从天顶摆到地平线东端，摆成这么一个巨大的半圆形，需要360个同月亮一样大的圆盘，这样就可以通过简单计算得出月亮的大小。我们已知地球到月亮的距离，也知道以该距离为半径的这个半圆形的周长，即π×半径，或π×400 000 km。月亮的直径必然是这个半圆形周长的1/360，这是3600 km，相当于地球直径的三分之一。月亮与地球间的距离只有地球直径的10倍多一点。月亮几乎是一个属于地球范围内的物体。

现在再来看一看其他的天体，首先看太阳系的成员，即太阳和其他行星。人们对行星运转已观测了许多世纪，但并不知道这到底是怎么一回事。在哥白尼之前，盛行的是地球中心说，如毕达哥拉斯的地球中心说模型(图1.1)。从哥白尼那个时代起才弄清楚，原来我们从地球上看到的行星的奇怪运动，是来自它们环绕太阳按圆形(实际是椭圆形，近于圆形)轨道运转，地球本身也环绕太阳运转。地球是行星之一，从太阳往外按行星轨道来数，地球是第三个行星。从地球上仔细观测行星运转，就能看出不同行星的轨道的相对大小。例如，我们从



哥白尼(1475—1543)
波兰天文学家

地球上观测到，水星总是靠近太阳的，它偏离太阳从不超过23°。从这一事实得出结论：水星轨道的半径是地球轨道半径的0.38，即三分之一多一点。同样的观测方法可得出，金星轨道是地球轨道的0.7，即三分之二多一点(图1.2)。这样，人们就能作出一幅比例正确的太阳系图，但是太阳系实际有多大，人们还不知道。

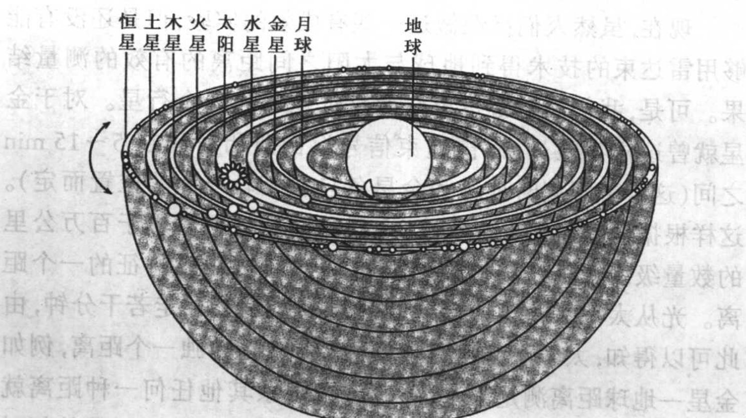


图1.1 毕达哥拉斯的地球中心说模型

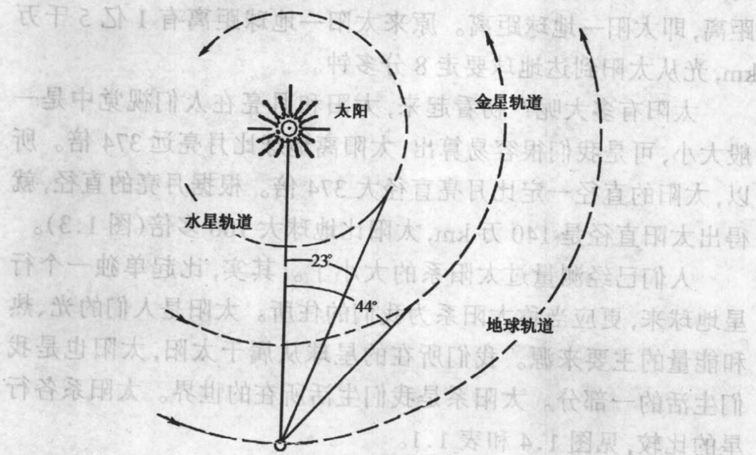


图1.2 人们见到的水星与金星离太阳的最大角度
(这些角度决定于地球轨道相对水星与金星轨道之间的比率)

那么我们又怎样求得这些轨道的大小，从而知道太阳系确实有多大呢？我们已经知道太阳系所有成员彼此之间的相对位置，所以，只要把一个成员离太阳的确实距离测量出来，就能知道所有行星轨道确实有多大。这里，我们仍然能够用雷达方法来测量太阳系以内的距离。

现在，虽然人们已经做过一些有成效的实验，但是还没有能够用雷达束的技术得到地球与太阳之间距离的有效的测量结果。可是，我们能把雷达束对准靠近地球的一个行星。对于金星就曾这样实验过，而雷达束信号返回所历时间在 5～15 min 之间(这要看观测时地球和金星各自在其轨道上的位置而定)。这样根据光的速率可以算出，金星离地球的距离属于百万公里的数量级。于是，我们可以得到足以表示太阳系特征的一个距离。光从太阳系的一个行星到达另一个行星，要走若干分钟，由此可以得知，太阳系究竟有多大了。一旦把单独一个距离，例如金星—地球距离测定下来，要确定太阳系其他任何一种距离就不再有困难了，因为我们已经知道了行星轨道的比例及其相对的大小。这样我们马上就能得出对地球上的人来说是最重要的距离，即太阳—地球距离。原来太阳—地球距离有 1 亿 5 千万 km，光从太阳到达地球要走 8 分多钟。

太阳有多大呢？初看起来，太阳和月亮在人们视觉中是一般大小，可是我们很容易算出，太阳离地球比月亮远 374 倍。所以，太阳的直径一定比月亮直径大 374 倍。根据月亮的直径，就得出太阳直径是 140 万 km，太阳比地球大 100 多倍(图 1.3)。

人们已经测量过太阳系的大小了。其实，比起单独一个行星地球来，更应当称太阳系为我们的住所。太阳是人们的光、热和能量的主要来源。我们所在的星球从属于太阳，太阳也是我们生活的一部分。太阳系是我们生活所在的世界。太阳系各行星的比较，见图 1.4 和表 1.1。

现在再让我们往太阳系外边看一看。

人们所看到的众多星星被叫做“恒星”，因为看起来，它们是

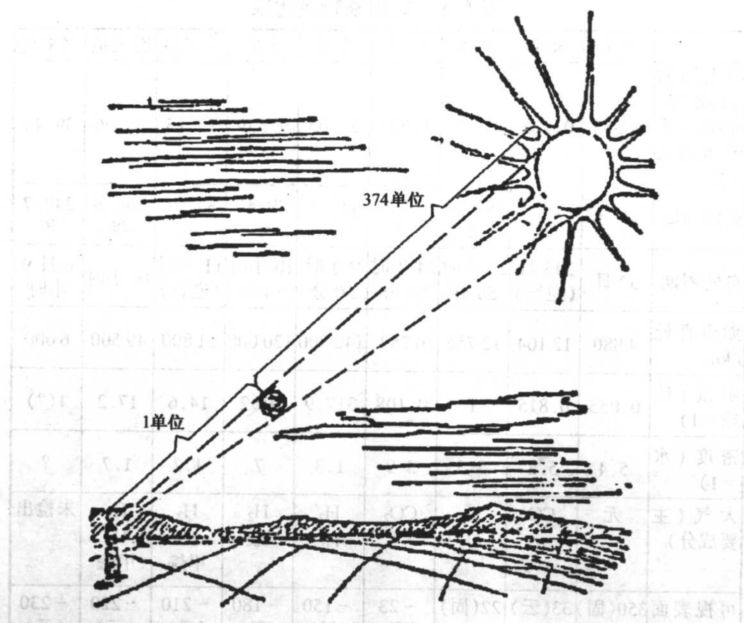


图 1.3 太阳和月亮对于地球上观察者的关系

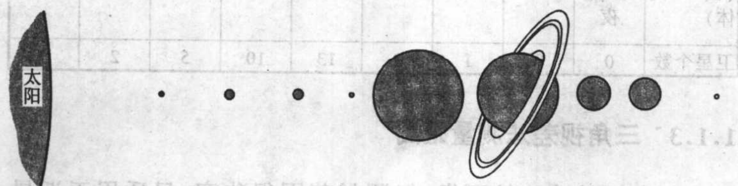


图 1.4 太阳系行星

不动的，而行星环绕太阳运转，则是明明白白可以看得到的。实际上，星星之所以为“恒”星，只是由于它们离我们太遥远了，以致它们的任何运动，都会慢得使人们一辈子也观测不出来。事实上，它们都在运动。精确的天空照片表明，相隔许多年后，星星的位置就有微小的变动。从古代文献推断，好几千年以前，有些星座看来和现在的大不相同。

可是星星有多远呢？下面介绍一些常用的测量方法。

表 1.1 太阳系行星比较

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
距太阳的平均距离(地球－太阳间距离=1)	0.387	0.723	1	1.524	5.203	9.539	19.13	30.06	39.44
公转周期	88 日	224.7 日	365.26 日	687 日	11.86 年	29.46 年	84.01 年	164.8 年	247.7 年
自转周期	59 日	243 日(逆行)	23 小时 56 分	24 小时 37 分	9 小时 50 分	10 小时 14 分	11 小时(逆行)	16 小时	6 日 9 小时
赤道直径/km	4 880	12 104	12 756	6 787	142 800	120 000	51 800	49 500	6 000
质量(地球=1)	0.055	0.815	1	0.108	317.9	95.2	14.6	17.2	1(?)
密度(水=1)	5.4	5.2	5.5	3.9	1.3	7	1.2	1.7	?
大气(主要成分)	无	CO	N_2 O_2	CO_2	H_2 He	H_2 He	H_2 He 甲烷	H_2 He 甲烷	未检出
可视表面的平均温度/℃(固=固体)	350(固)昼 －170(固)夜	33(云) 480(固)	22(固)	－23(固)	－150(云)	－180(云)	－210(云)	－220(云)	－230(云)
卫星个数	0	0	1	2	13	10	5	2	0

1.1.3 三角视差法测量距离

三角视差法比较可靠，但测量范围很狭窄，只适用于近星，为了说明三角视差法，举一个简单的例子(图 1.5)。在一个人的前面放一个苹果，让他交替闭上一只眼，只留一只眼单独注视苹果，右眼见到的苹果在书橱前，左眼见到的苹果却是在窗户前。即被观察物体的位置相对于远处的景物移动了一个角度，测出这个角度的大小和两眼的距离，用简单的几何学就可以算出被观察物体离眼的距离，其中，从不同位置(例如左、右眼)观察同一目标(例如苹果)所出现的相对于远方景物(窗户，书橱)的位置差别，称为视差。描述视差的角度称为视差角，不同观测



图 1.5 视差角显示

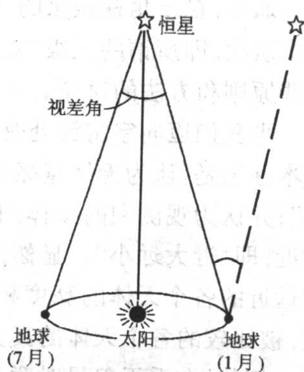


图 1.6 利用视差测恒星位置

位置之间的连线称为基线，这种测量目标距离的方法，称为三角视差法。在地面上，对于某些难以直接丈量的目标，如河对岸的目标、大楼的高度等，可以采用三角视差法确定距离。天文学中，三角视差法是测量恒星距离的基本方法(图 1.6)。不难设想，当目标很远时，如果基线不够长，那么视差角太小，就会影响测量的精度，甚至根本无法测量。

在天文测量中，通常取地球绕太阳公转的轨道直径(3×10^8 km)为基线，当被测天体的视差角为 1 角秒时，该天体的距离称为 1 秒差距，写成 1 pc，秒差距和光年(ly，光在一年时间内行进的距离)是天文学中常用的距离单位，1 pc = 3.26 ly ≈ 3×10^{13} km。天体越远，视差角越小，测量就越不准确，也越困难，最小可测的视角约为百分之一角秒，但较准确的测量只能达到 20～30 pc。在太阳附近可以观测到的恒星的数密度为 $0.08/pc^3$，在 20 pc 范围内可观测到的恒星只有 2681 颗。格里瑟(Gliese)在 1969 年测量了 20 pc 的 1049 颗较亮的星。

1.1.4 光学法测量距离

三角视差法虽然比较准确，但只适用于范围相当狭窄的比

较近的恒星,需要以此为基础,由近及远地一步步迈向宇宙深处。通常,在三角视差法的基础上,把各种测量星系距离的方法分成层次,即所谓的三级“宝塔”。在具体介绍之前,让我们先作一些原则和方法的讨论。

当我们迈向宇宙深处时,为了测定天体的距离,天文学家的基本办法是:认为天体越亮离得越近,越暗离得越远,即“亮近暗远”;并认为观测到的天体的大小越小离得越远,反之越大离得越近,即“近大远小”。显然,以天体亮暗论远近的前提是,被比较远近的各个天体的亮度相同且已知;而以大小论远近的前提是,被比较的各个天体的真实大小相同而且已经知道。

例如,在看天狼星时联系到一个大家熟知的事实:两个亮度相等的光源,其中一个离我们比另一个远 n 倍,那么,较近的光源看来就比较远的光源亮 n^2 倍。我们把这个定律应用于天狼星和太阳。太阳看来比天狼星亮得多。把它们的光强度比较一下,就发现太阳比明亮的天狼星要亮(100 万)^2 倍。因此,照上述定律推算,天狼星一定比太阳远 100 万倍! 其他的星星,例如北斗七星,它们的亮度大约比天狼星弱 9 倍。如果上述关于相等亮度的假设是正确的话,那么,北斗七星一定比天狼星还远 3 倍。因此,如果大多数星的亮度是大致相等的话,那么就容易得出所有星星的距离,也就容易得出我们的可见宇宙的大小了。

对一般介绍亮近暗远的测定星系距离的方法,首要的任务是寻找这样一些天体:它们的亮度固定,而且在测距宝塔的前一级方法中,能够把近距的该天体的距离和亮度测出来,因为它们亮度固定,每一个这种天体都仿佛是具有相同亮度的同样的蜡烛,因此被称之为“标准烛光”,经过前一级测距方法定标后,如果再测出它在远处的视亮度,两相比较,即可推断它的距离。显然,“标准烛光”愈亮,就可以在更远的地方观测到,从而可以测定更远的距离——宝塔第一级所用的几种方法都属这一类,宝塔第二级中属于这一类的有球状星团亮度的办法、球状星团中亮星的方法、星系中最亮恒星的方法,第三级中的超新星方法、

亮星系方法也属这一类。

近大远小的方法在天文上应用也较普遍，在天空中，太阳和月亮的大小看起来相仿，都是 32′左右，这是因为太阳直径比月亮大 374 倍，而距离又恰好远了 390 倍，所以角大小几乎相等。对于大小相同的天体，即“标准尺”，它们的角度大、小，必然是近大远小，即我们看到的天体的角度大小与天体的距离成反比，所以，只要能从前一级测距方法中确定它们的真实大小，再与观测的角度大小相比，就可以得出它的距离。

为了这样由近及远地估计天体的距离，需要作一个重要的假设，即关于自然界一致性的假设：假定在较近处的任何天体的基本特征，与在更远处类似的天体应该相同。但是，我们往远处观看时，我们也就是在往过去观看，因为光由远处向我们传来需要很长的时间，由于存在着天体的宇宙学演化，所以远处天体有可能与近处的类似天体有所不同。例如，现在已经可以肯定，宇宙早期射电星系和类星体的数密度及它们的亮度都比我们附近要大，因此这时就需要慎重处理，但在大部分情况下，这个假定与观测并不矛盾；又例如，河外星系中的造父变星与银河系中造父变星的光谱和光变曲线就颇为相似。以上就是测量天体距离所遵循的一般原则和基本假设。现在，我们可以对测量星系距离的三级“宝塔”逐级具体介绍了。

在第一层“宝塔”中，用来作为标准烛光的天体是造父变星、天琴座 RR 变星和新星。

所谓“变星”是指在不太长的时间内（几小时到几年内），亮度有周期性变化的恒星。而造父变星是根据中国古代所取星名叫“造父一”的星，“造父一”的亮度随时间变化的曲线叫做光变曲线，其周期为 5.37 天。随着时间的推移，变星数会增加，现在把这些变星统称为造父变星。

随着测量的星系越趋遥远，在第一层“宝塔”中作为标准烛光的造父变星、天琴座 RR 变星及新星，或者由于太暗淡而无从观测，或者由于待测量系中不存在这些作为标准烛光的天体而

无能为力。因此，为了适应更广泛的需要，必须寻找新的更有效的可以作为标准烛光的天体或天体群。它们应该更亮更遥远，并具有可以用来定标的特征。于是，球状星团和星系中最亮恒星的方法应运而生了。

用来作为标准烛光的球状星团不是一颗星，而是成千上万颗甚至几十万、上百万颗恒星密集而成的球状集团。同一球状星团中各成员星的运动方向、速度以及离我们的距离都大致相同。第一层“宝塔”中的天琴座 RR 变星，通常就出现在球状星团之中，利用天琴座 RR 变星，可以测出它所在的球状星团的距离，再根据观测到的球状星团的视星等即可定出该球状星团的绝对星等。（对于“视星等”，“绝对星等”的定义，请参阅有关的天体测量书籍。）



伽利略用过的望远镜，
现保存在佛罗伦萨的物理博物馆

标准烛光之三是超新星。首先讲“新星”，“新星”是爆发变星的一种，通常它在爆发前很暗，只有爆发时才变得很亮，可以增加 11 个“星等”，相当于增亮几万倍；超新星也可以看作一种变星，是恒星演化到其生命终点时发生的，其爆发规模远远超过新星，爆发时能增亮千万倍甚至上亿倍，最亮时的光度可与整个星系的光度相比拟，绝对星等可达 −20 等。而目前光学望远镜不难测到 20 等星，故超新星适用的距离模数（视星等与绝对星等之差）约为 40，即可测至几亿秒差距的距离。近年来，观测到的河外

星系中超新星的数目增加很快,1910 年前观测到的只有 3 个,1940 年累计到 39 个,至 1988 年底累计观测数目已达到 661 个。

超新星确定距离的办法与新星相同,把超新星达到最亮时的视星等与其绝对星等相比就可以定出超新星及其所在星系的距离。这个方法的一个复杂之处是超新星有多种不同的类型,它们最亮时的绝对星等并不相等,因此,需要通过光谱的观测对超新星作出分类,目前最适合于定距离的是 I_{α} 型超新星,它的绝对星等弥散很小,可以发生在各种类型的星系之中,又是最明亮的一类超新星,是当前宇宙学研究中确定星系距离的最佳选择。可惜发现超新星的星系还不很多,能够同时有分类的就更少,1988 年底已知分类的河外超新星只有 267 个,只占观测总数的 40%。

总之,人类通过不断地改进和发展各种观测手段,不断地寻找各种可以作为标准烛光的天体,提出了很多测量星系距离的方法。构筑成上面描述的三层“宝塔”,拾级而上,循序攀登,逐步迈向宇宙的深处。不难设想,下一层测量的不准确,将对上一层产生不利的影响,越往上误差越大,目前,在 100 秒差距以上的恒星定距就有争论,近星系距离的测定误差至少在 10% 左右,远星系距离估计误差可达 50% 以上。可能这种估计还是过于乐观。实际上,自从发现星系以来,对于星系距离的估计已经有过几次修正了。通过以上叙述,希望读者获得一个印象,即对星系距离的测定还不能像在地球上所习惯的各种距离测定那样精密和准确,另外,对非常远的距离测定还要考虑宇宙学演化的影响。

现在让我们再来观看天空,并想像出一幅太空中星的图画。我们看到明亮的星,也看到暗淡的星,暗淡的比明亮的多得多。如果用一副放在坚固基础上的望远镜更系统地观看,就能清楚地看到,暗淡的星决不是均匀地分布在天空中的。银河以内或靠近银河的暗星比在银河以外的区域中要多得多。用性能良好

的望远镜向远离银河的方向去看，就看到少数明亮的星，十分暗淡的星则几乎没有。但在银河以内，视野的本底上则有千千万万颗星闪闪发光。

这是怎么回事呢？这说明星不是均匀地分布在空间的，而是集中在一个扁平的圆盘里。我们太阳系就在圆盘里的某一个地方。当我们往圆盘里面观看时，就看到许多星以及许多暗淡的、遥远的星；但当我们的视线同圆盘的平面垂直时，就只看到少数的星，而且由于离我们较近，因此这些都是比较明亮的星。

那么，包含着我们能见到的天上全部星的这个圆盘有多大呢？我们仍能运用我们的假设去测量对着圆盘（银河）观看时以及对着圆盘平面以外的区域观看时所见到的最暗淡的星的表观亮度。为此，就需要一个能够辨别银河里面每一个星球的强大望远镜。然后，就能应用前面所讲的测定距离的简单方法。结果是：往圆盘里面所看到的最暗的星比往圆盘以外所看到的最暗的星还要暗大约 100 倍。因此，圆盘的半径一定比它的厚度大约大 10 倍。银河里最暗的星比天狼星大约暗 1 亿倍，它们的距离比天狼星一定远 10 000 倍，即大约 10 万光年（图 1.7）。

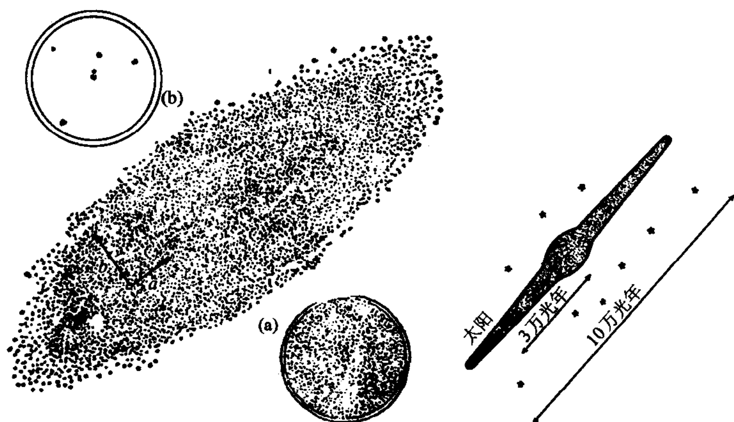


图 1.7　银河系的略图（其中标示了太阳的位置以及 a 与 b 两个视线方向）
(a) 用望远镜往银河系里面看到的星；(b) 往银河系外面看到的星

天上暗淡的和明亮的星的分布告诉我们:这些星构成一个圆盘,直径 10^5 光年,厚度 10^4 光年。太阳和地球位于从圆盘中心到边缘的一半的地方。这个扁平的群星聚集处叫做星系,它是我们的银河系,在这个星系中,众星间的平均距离大约为 10 光年的数量级。这是太阳和我们周围最近的恒星之间的距离,看来也是银河系以内相邻的恒星之间的正常距离。由此就能够粗略地算出银河系内有多少颗星。得到的结果大约为 500 亿颗星的数量级。

现在我们关于银河系结构的知识已经比过去多得多了。银河系中不仅有星,而且有气体和尘埃,特别是在中心部分。这种星际物质给我们在应用简单方法测量距离时造成困难。通过尘埃和气体区域看星时,这些星要显得暗一些,我们就可能作出星比实际距离还要远的错误结论。但是天文学家已经研究出许多方法去克服这些困难。例如,现代的射电天文学提供了一个测量星际气体位置的好方法,这种气体发射出表示氢原子特征的某些明确的无线电波,说明氢是星际气体的主要元素。用这种方法和其他方法,我们发现群星聚集成巨大的星流,而星流又形成巨大的旋臂,围绕着圆盘平面的中心,构成银河系,这样的群星聚集处是我们生活所在的宇宙环境中比太阳系更大的单位。我们首先是把地球,然后把太阳系看作我们的住所。现在,我们认识到,太阳、连同它的行星,仅仅是银河系这个大集体——有几百亿颗星——中的一小部分。那么,在银河系以外,又有什么呢?

我们用望远镜再来观看更遥远的星空,我们能看到银河系里有几百亿颗星。但是,我们有时也看到某种并非星球的东西,那是星云,一种扩展的光区。猎户座星云就是一个著名而美丽的星云。已经认出,猎户座星云和其他许多星云是巨大而发光的气体云。但是,还有其他星云——最突出的是仙女座星云,用小仪器来观看,它们像圆盘形的发光区。用十分强大的望远镜来观测这些东西,就会发现它们包含着数量巨大的极其暗淡的

星，排列成圆盘状的涡旋形阵容，就和我们的银河系一样。这可是个了不起的发现！我们的银河系并非惟一的星系。还有其他类似的星系，这些星系的数目很大。望远镜越大，能看到的星系也越多。而且它们看来延伸到空间深处。它们有多远？又是怎样分布的呢？

我们再一次能从这些天体的表观亮度来得到它们的距离的概念。现在来看仙女座星云。粗略地说，它的总亮度等于距离10光年左右的一般星的亮度。十分强大的望远镜显示：这一单位量级距离上的星的数目同我们银河系的星的数目相似，大约500亿颗。因此，我们的结论必然是，仙女座星云实际上比我们邻近诸星之一要亮500亿倍。仙女座星云看来和邻近的星一样亮，因此它的距离必然比邻近星的距离大$\sqrt{500亿}$倍，即10光年×$\sqrt{500亿}$，这就是大约200万光年。经过更加准确的方法核对，这个数字大体上是正确的。银河系和紧挨着的另一个星系之间的距离大约是银河系直径的20倍。我们看到的来自仙女座星云的光，在它离开光源的时候，人类还没有从猿猴般的祖先那里演化出来呢。

同样的方法可以应用于我们所见到的天上其他星系：拿另一个星系的表观亮度同仙女座星系的亮度来比较，比方说，前者要暗X倍，那么，我们的结论是这一特定的星系大约远$\sqrt{X}$倍。这样一个结论是以所有的星系，十分粗略地说，都是大小相等、实际亮度相等这个假设为依据的。许多细致的观测肯定了这个假设。

这样，对于用强大望远镜可以见到的许多涡旋星云的分布情况，我们就有个概念了。今天，已知的涡旋星云有好几百万个，它们在各个方向相当均匀地分布着，相邻星云之间的平均距离是几百万光年。银河系同仙女座星云之间的距离一般说来大约等于各个星系之间的平均距离。看得越远，发现的星系就越多。可是这样的探索到底有没有个尽头呢？

这个问题不能够肯定地回答，因为几十年前已经探测到一

种非常有趣而又出人意料的现象，所有这些星系都在离开我们而去，星系离我们越远，跑得越快。我们是怎么知道的呢？

我们必须更加仔细地观察从这些星云发来的光，它是构成一个星系的500亿颗星的光的总和。我们在中学学习物理学时就知道，光是一种电磁波，其频率决定了光的颜色，通过棱镜等方法可以使它展成光谱。如在棱镜中，光通过棱镜折射后按频率大小排列，较低的频率在一边，较高的在另一边。研究了星光，我们知道，虽然所有的颜色似乎都有，但是某些频率却消失了。当我们观察大多数恒星的光谱时，确实发现缺少了某些频率。这些缺少的频率是被恒星表面的寒冷气体所吸收了的那种光的频率。我们见到的光谱上的暗线恰恰就表征这些频率的光如果没有发生气体吸收应处的位置。例如，大多数恒星光谱在紫色部位有两条暗线，它们表示气态钙的吸收。发现遥远星系的光谱中都有同样两条暗线时，我们并不惊奇，因为它们的光不过是它们所有星的光的总和。但是，使人或曾经使人惊奇的是，同样的两条暗线不在意料中的频率处发现，而是朝低频方向移动。就十分暗弱的星系来说，这种位移很大，以致我们看到的暗线在光谱红色的一端，而不在紫色的一端了。

人们已经熟识了这种频率的位移，并可以直接地解释为目标对观测者相对运动的结果。当光源离开观测者时，它发出的光的频率似乎变低，正如汽车从我们这里开走时，汽车喇叭声就低下来一样，这即是多普勒效应。频率位移同速度成正比，因此能用来确定目标离开我们的速率。光和声的多普勒效应结果见图1.8。

于是，必须做出这样的解释：观测到的遥远星系的光的频率位移证明，这些星系正离开我们而去，这种运动的速率是同距离成正比的。像仙女座星云这样靠近的星系，它们的运动简直观测不到，可是距离约为1亿光年的星系就以每秒3000 km的速率飞离而去。已经发现，这种km/s作单位的速率数值大小总是在以100万光年为1个长度单位时去计量而得的距离数值大

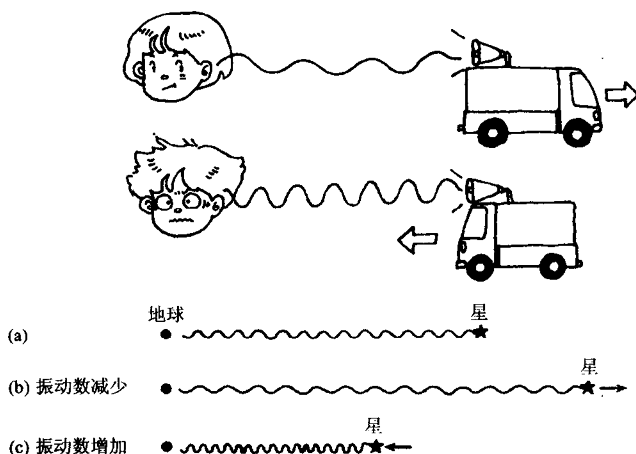


图 1.8　光和声多普勒效应结果

小的 30 倍左右。速度与距离的这一关系是美国天文学家埃德温·P·哈勃于 1929 年首先发现的。现在,最大的望远镜能够探测远达 30 亿光年的星系,它们以 90 000 km/s 的速率飞离我们而去,这几乎是光速的 1/3。这种远离我们而去的速率称之为退行速率。

由星系组成的宇宙的膨胀运动给我们指出,我们到底能看到多远,极限在哪里。我们可能建成更大的望远镜,试图看到更远的星系,但是它们会以越来越接近光速的速率离我们而去。目标以接近光速的速率离开我们时,它的辐射看来就会减弱。事实是,它的速率越接近光速,它就越显得隐隐约约,越是难以见到。

之所以如此,其原因是容易理解的。现在请你把光源所发出的光比作从一支枪向四面八方射出来的子弹。很明显,枪支以几乎等于子弹的速度离开我们后退时,子弹命中的次数就少,力量也弱。

因此,即使还有很多星系离我们比大约 100 亿光年还要远(按照哈勃关系式,距离为 100 亿光年,则退行速率等于光速),即使星系无限多,我们也不能看到;它们飞离我们如此之快,因

而它们的光由强减弱到使我们再也观察不到。

宇宙中星系之间的距离不断膨胀,使我们面临一个饶有意味的情况:很可能有无限个星系扩展到无限的距离。但是,我们只能看到以适当地低于光速的速度而退行的那些星系。因此,所发射的光能够到达我们这里的星系为数是有限的。即使宇宙确实是无限的,就我们观测来说,宇宙还是有限的。我们能加以探索的只是能以其光信号送达我们的那一部分宇宙。

值得注意的是,我们今天所掌握的天文仪器,例如帕洛玛山望远镜,已经深入到退行速率为1/3光速的距离。这与我们今后终于能看到的最远距离相差不太多了。如果我们再能深入宇宙3倍左右,那就看到了人类一般理解的全部可见宇宙。因此,我们今天亲眼看到人类发展史中一个伟大时刻,可与麦哲伦1520年首次绕地球航行一周这一成就相媲美。那时,人们绕行地球这个行星,认清了地球上旅行的极限。今天,我们开始深入去把宇宙的极限圈定下来。我们可能正在开始观测我们所能观测到的最后目标。现在把我们推论出的东西总结一下,就可以看出人类在自然界中的位置,但是,这里我们只是在向距离、长度变大的方向发展。为了有个全貌,下面把物理上所常见的一些距离写出供大家参考:

	单位:m
一个"基本"粒子的大小	$<10^{-18}$
质子的大小(8.9×10^{-15}m)	10^{-15}
重元素核的大小	10^{-13}
密度高的恒星中原子间的距离	10^{-12}
金属、结晶中原子间距离	10^{-10}
橄榄油等的单分子层单层的厚度	10^{-9}
常温下普通空气中气体分子的平均自由程	10^{-8}
带色肥皂泡最薄处的厚度	10^{-7}
鞭毛细菌的大小	10^{-6}
人的毛发粗细(0.06~0.12mm)	10^{-4}
铅笔芯粗细、窗玻璃厚度	10^{-3}

一分硬币半径	10^{-2}
人手掌宽度	10^{-1}
实验桌宽度，门的宽度	10^{0}
房间的宽度	10^{1}
一列火车总长，大型船舱	10^{2}
步行 13 分钟	10^{3}
远景目标	10^{4}
马拉松距离（42.195 km），或 200 海里的距离 = 3.7×10^5m	10^{5}
月球的赤道半径（1738 km）	10^{6}
地球大小（赤道半径 6378.14 km，极半径 6356.755 km）	10^{7}
地球—月球平均间距	10^{8}
地球—太阳间距（即 1 AU = 149 597 870 km）	10^{11}
太阳—冥王星最大距离	10^{13}
最近的恒星与地球间距	10^{16}
太阳—天狼星间距	10^{17}
视差法测定的最大距离	10^{18}
银河系大小	10^{21}
邻近星系间距离	10^{22}
宇宙大小（1 百多亿光年）	10^{26}

从上表来看太大、太小的概念使我们的直觉开始模糊起来了，用人类的一般的理解，难以得到直觉上的答案。

1.2 人类在时间中的位置

1.2.1 时间的间接估算

日常生活涉及的时间的自然单位是日和年，有文字记载的历史，可以追溯到 5000 年前的远古时期。如要知道人类史前大事年表，就必须应用间接的方法。

那么，世界的年龄有多大呢？无直接记载的文献可查。考虑我们周围环境自然物质形态的变化，是间接估算时间的一种

方法。

我们四周的大型自然形态——高山、丘陵、河流、海洋、平原,等等——在有史记载时期没有发生多大变化。难道它们一向是这样,永恒不变的吗?显然不是,它们受到风雨冰雪的侵蚀。

外国有人考察了位于意大利和瑞士之间的阿尔卑斯山脉之中的马特洪山,它高出紧邻地带大约 2000 m,山麓宽约 2000 m。因此,粗算起来,它含有岩石 $2\times10^9\text{m}^3$,山坡面积约为 10^7m^2。由于天气——雨、冰和暴风雨——的作用,主要是裂缝里的水冻结成冰的结果,山上到处有小块岩石碎裂下来,巍峨的结构就慢慢地毁掉了。把马特洪山化为平地需要多久呢?我们来作一次简单的计算。平均来说,每平方米每年有几寸大小的一块岩石碎裂下来,这是个合理的假设。于是马特洪山每年约有 $10^3\ \text{m}^3$ 的岩石掉下来。100 万年以后,半座山就没有了。像马特洪这样的高山的寿命必然属于几百万年这一级。当我们研究由河流运送给海洋的泥沙时,得出了同样的结论。我们能够测量在一年内经雨水从陆地冲刷下来,并由河流输送入海的细粒状的岩石、细沙和土壤的总量。这些泥沙如果均匀地散布在江河所流过的地面上,就会铺成很薄的一层,只有 1 cm 的 1/300 厚。但是,经过 100 万年,就有 30 m 厚的一层了。细粒状岩石等不是从各个地点均匀地冲刷下来,而是从有坡度的地方冲刷下来,因此,在 100 万年里风雨冰雪能够搬掉成百上千米高的丘陵,地貌的改变也就可观了。所以,我们看到的四周地貌的年龄能以百万年来计算。

风雨侵蚀是造成地壳形状,使之平面化的破坏性力量。如果没有其他力量起作用,世界就全是平坦的了,因为高山和丘陵会早就在几百万年里清除掉了。但是,还有建设性的力量在起作用,它缓慢而不断地改变着地壳。地球内部由于负担外层的全部重量,经受很高的压力。这种压力有时在一处消除,或在另一处增强。压力的变化引起地壳上下运动,造成高原和深洼地,有时地壳作横向运动,地壳褶皱起来,造成山脊和峡谷,就像把

一幅布从两头往中间推时，布就褶皱起来一样。山的形成和随后的侵蚀是不断地相互作用的。我们生活的时代和一个十分剧烈的山脉形成的时代相隔只有几百万年，这就是为什么地壳现在呈现出这么多不同山脉的缘故。从现在起大约5千万年以后，如果在此期间不发生新的形成山脉的事件的话，地球可以变得平坦得多，也就不像现在这么有趣。图1.9为地球的演化过程示意图。

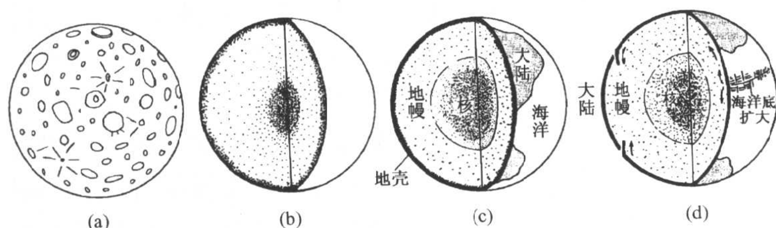


图1.9　地球的演化

1.2.2　利用放射性计测时间

山脉形成和大气对山脉破坏的不断相互作用究竟进行了多久呢？怎样才能把过去发生的一件件地质大事之间的相隔时间计算出来呢？可以使用一种天然计时器，它转动得非常慢，足以使我们认得出它所计量的悠久年代。幸运的是，自然界提供了一种非常缓慢而又有规律性的过程，能用来测量时间。这就是放射性。它是法国人亨利·贝可勒尔在1896年发现的一种奇异现象。但是，放射性又怎样当作计量器来使用呢？

当发现放射性时，人们都感到迷惑不解，因为放射性把化学元素不可改变这一旧信念否定了。放射性现象说明，某些化学元素不是不可改变的。一种放射性物质变成另一种物质，这种放射性物质的原子放射出射线，经过衰变，成为另一种元素的原子。

下面来考察一个实例——放射性铷。铷是比较稀有的金属元素，和钾、钠有点相似。自然界发现的铷有两种（两种“同位

素”)，它们重量不同。一种铷的原子量是85，另一种铷的原子量是87，其中较重的一种是放射性元素。一块纯铷87原子变成另一种原子，即变成一个锶原子。这种变化以固定的速率缓慢而稳定地进行，这个速率不因任何外界影响而加速或减慢。每年有一点儿铷87变化成锶。就铷来说，这一点儿极其微小，每年只有1.6×10^{-11}。这就是说，每年有一千亿分之一的铷87变成锶。在自然界发现的大部分放射性物质都是这样缓慢地变化的。铀的“衰变常数”是每年2×10^{-10}，这就是说，每年只有一百亿(10^{10})分之二发生变化。钾40也是放射性元素，衰变常数是每年0.7×10^{-9}。

自从发明了高能加速器(原子击碎器)以后，有关放射性的知识就大大增加了。在加速器里，微粒子带着高能被投掷出来，打击各种物质的原子，并使原子产生变化。例如，正常的非放射性元素在这些机器里受到轰击，就变成新的、多半是自然界里找不到的，并且往往是放射性的元素。因此，人们能够生产新的、“仿真”的、人造的、在物理学和医学研究方面具有重大价值的放射性材料，它们的大多数变化起来比天然放射性元素要快得多。例如，人们能够生产放射性钠(原子量24)，它以每小时百分之六的速率变化成镁。

因此，地球不可能是永恒地存在下来的。在地球上有的东西也不可能是永恒地存在下来的。如果地球存在的时间是无限的，我们在地球表面就找不到天然放射性物质如铷87、铀和钾。其实，如果地球年龄大大超过10^{10}年，那么前面提到的自然产生的放射性物质就已几乎全部变成它们的子体产物，而不会被人发现了。我们也就必须假定，制造这些元素的过程不再继续了。

那么，地球的年龄有多大呢？看一看在自然界发现的放射性物质的衰变常数，我们注意到，衰变常数总是小于每年十亿分之一。可是人造放射性材料——我们自己生产的元素——具有各种衰变常数。从缓慢的衰变，例如每年衰变小于百万分之一，

直到真正迅速的衰变，例如在大约半秒钟之内就衰变一半。在这两个限度以内的所有的衰变常数的实例都已找到了。但是，我们在自然界看到的衰变物质，总是以慢于每年十亿分之一的速度而衰变的。这一点是比较容易解释的。衰变速度更快的物质之所以找不到，是因为在地球存在时期内，它们已经消失了。

由此，可以得到的结论是，构成地球的物质以其目前情况而存在下来的时间一定有几十亿年，但也不会超过得太多。天然放射性元素衰变最快的是铀（铀 235）（每年十四亿分之一），铀 235 已接近消亡，在普通铀中只占很小的百分比（0.71%）。因此，构成我们地球的物质的“年龄”必然比 10 亿年大一些，也许大 5 倍或 10 倍，但不会大很多。

在地球上找到物证，说明地球并非是永恒地存在下来的，那是我们对世界的科学认识史中给人以深刻印象的一个时刻。放射性物质仅仅是地球的一个微小部分，它们极其罕见。尽管如此，它们的存在就是某种起源的见证。

地球的起源是怎么回事呢？显然，地球最初不可能像现在这样。那时，构成地球的物质必然受到能够产生放射性元素的一些条件的支配。这些条件就是我们在大型核加速器里所制造的条件。粒子和原子必然以极高的能量并在很大的密度下运动，以很快的速度互相碰撞。产生这些条件所需的温度范围为 1 亿℃上下。我们有充分的理由相信，这些条件产生于星球的中心，不是在一般情况下都有，而是当星变为不稳定而且爆炸的时候才有。爆炸中的星就是我们前面所提过的新星，因为它们作为新的星在天空突然出现，并在几个月内隐没不见。它们并不是很不寻常的东西。使用巨型望远镜，我们能在一个星系的 500 亿颗星中每年发现二三十颗新星。

因此，可以得到的结论是，构成地球的物质必然经受过可能是从星星爆炸中产生的极大的热和加速度，时间大约发生在 50 亿到 100 亿年以前。可以认为这些事件创造出了我们的环境所有构成的种种元素。那时，创造了许多放射性元素和非放射性

元素,包括能用机器制造的所有元素,而且肯定还要多一些。可是寿命较短的放射性物质早已衰变并变为稳定元素。少数寿命较长的天然放射性物质是形成各种元素(这些元素组成今日地球上的物质)的重大时期的最后见证者。它们是从百亿年前创造我们现在所见到的地球上四周物质的宇宙烈火中留存至今的最后一点余烬。

对天然放射性衰变过程进行更为细致的分析,就能测定比元素之诞生要晚一些的其他事件。大多数含有天然放射性产品的矿石也含有放射性的衰变产物,例如,在含有铷的岩石里,也找得到由放射性铷变化而成的元素——锶。把岩石里铷和锶的相对量比较一下,就能算出铷在这块岩石里保存了多久,换句话说,就能计算出这块岩石自从凝固以后已经历了多久。计算很简单。每年有 1.6×10^{-11} 的铷变成锶,于是人们对观测到的总量能够推断出需要多少年才能形成。

这里只有一个困难:岩石里的全部的锶未必都是由铷变化而来的。这块岩石里也许就有一点原来的锶。要避免这个困难,有个很好的办法。从铷变化来的锶是很特殊的一种锶,即锶87。正常锶只含有12%的锶87,大部分是另一种锶同位素,即锶88。因此,人们需要做的只是把岩石里的锶88的量也测量一下。如果岩石里面没有锶88,那么,锶87必然全部都是从放射性铷那里来的。如果岩石里有一些锶88,那么,我们就知道岩石里掺杂了多少普通锶,并能测定,由于放射性衰变而加上了多少锶87。

可以用同样的方法来测量含有其他任何天然放射性物质的岩石。为此目的,广泛地利用了钾和铀的放射性。

天然放射性物质不仅充当地球起源的见证者,当它们有规则地衰变而缓慢地消失时,还能当作计时器来用。

测量放射性衰变产物,例如由铷变化而来的锶,就能确定在元素形成之后的几十亿年里所发生的重大事件的时代。每逢新山脉出现,每逢海洋把沉积物留在海底,物质里所含有的放射性

元素就开始积累它们的衰变产物,把积累起来的总量测量一下,就能计算事件发生的时代。这样,我们就得到了相当精确的地质大事件发生的年代,就得到了相当精确的地质大事件的时间表。几年前,美国加州大学的地球化学家在《地球与行星科学》期刊上推测喜马拉雅山脉进化的时间要比大家认为的晚 1500 万年,我国的喜马拉雅山脉很年轻,只有几百万年。阿巴拉契亚山的平坦山脊竟老达 2 亿 5 千万到 3 亿年,虽然山峰表面的实际形状从那时起已经改变过多次了。到现在为止,已发现的最古老岩石的年龄是 26 亿年,因此,地球的年龄至少有这么大,很可能超过 26 亿年。但是,这个行星现有的表面所经历过的变化太大了,以致今天找不到能够说明地球年龄更大的岩石。岩石和沉积物的不同层次里含有动物和植物的化石。所以,地质构成的时间表和生命发展的时间表是直接相连的(图 1.10)。我们发现,最早的生命记录约在 6 亿年前以海藻和海绵的化石开始(图 1.11)。显然,还有更早的、未在岩石里留下记录的、更处于原始状态的生命。据估计,原始细菌的存在,总有 10 亿年或 10 亿年以上了。已经找到大约 3 亿年前的鱼类和蜗牛,开始有爬行动物约在 2 亿 7 千 5 百万年以前;后者的出现是要等到树



图 1.10　三叶虫(Olenellus),寒武纪研究地球史的最著名的化石形式之一

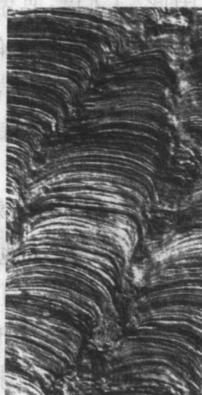


图 1.11　30 亿年的蓝藻类的化石

木、花卉第一次出现之后的，树木、花卉第一次出现的时间应在4亿年以前。哺乳动物的发展只是1亿5千万年前的事，而自有人类以来，不过100万年而已。这样，放射性计时器也有助于说明生命发展的年代。

1.2.3 利用陨石计测太阳系年龄

有时候，一块物质突然从外层空间进入到大气中。这些东西——叫做陨星——进入大气时，大多数由于高速度穿过空气，产生炽热而气化了。但是也有较大的块头，完整地到达地面。人们研究了这些物体及把它们引导到我们这里来的途径。陨星大概不是从很远的地方来的，它们可能是太阳系历史初期某个时代一个或几个小的行星分裂瓦解时所产生的断片残块。这些岩石的年龄必然和太阳系本身的年龄相近，它们可能追溯到物质聚集为太阳和行星的那个时代。因此，当我们能够测定这些碎块的年龄时，大概也就测量了太阳系的年龄，或行星形成的时代。幸而，陨星有时含有放射性物质及其衰变产物的痕迹。衰变产物的数量能用来测定这块来自外层空间的物质中放射性物质衰变了多久。测量结果总是很一致的：所有的陨星好像年龄都一样，都是45亿年。于是我们作出这样的结论，即物质聚集为太阳系行星以来已经经历了45亿年。十分可能，地球和其他行星作为环绕太阳运转的巨大球体而存在以来，也有了45亿年了。

1.2.4 利用光推算星体年龄

我们能够测定其他星的年龄吗？由于没有物体从太阳系以外来到我们这里，因此，就不能够利用放射性计时器了。惟一的联络工具是光。然而，尽管缺少直接的接触，天文学家总在试图取得有关星的年龄的间接资料。仔细研究星的颜色和亮度，以及运用我们对于维持一颗星球长期发光、发热所需全部巨大能量之产生过程的新的概念，利用各种星体观测的光学分析，有时

可能得到某些推测性的结论。根据这方面的论证,大部分星的年龄也以几十亿年计。有些星群的年龄可能有200亿年或300亿年,其他的也许年轻些。

1.2.5 宇宙的历史

正如年是计算人生的适当单位,10亿年是计算星球的寿命的适当单位。地球上最古老的岩石的年龄是26亿年;太阳系必然是在45亿年前形成的;天然放射性物质是50亿年或100亿年前从某种星体爆炸中形成的;而大部分星球的年龄似乎也在50亿年到100亿年之间。

宇宙的膨胀现象也给了我们宇宙发展的时间尺度:今天,我们看到星系不断地离我们而去,星系离我们越远,走得越快。于是,我们就能提出问题来:如果星系确是互相分离而运动着,那么,难道就肯定没有星系曾经是互相较为靠近的时候吗?其实,如果宇宙膨胀早就按照目前的速度进行,那么,我们看到的星系的膨胀,不可能是永恒地进行下来的。它们是在什么时候挤到一处的呢?某个星系离开我们的距离大约是100万光年,以30千米/秒的速率走100万光年的距离需要的时间为100亿年。这就是说,星系自从以同样的速率膨胀到现在,为时不能超过100亿年。追溯星系的膨胀,我们必然得出结论说,100亿年前,所有的星系,粗略地说,是集中在同一地方的。而最新得出的结果宇宙大爆炸是在150亿年之前。

于是,我们又发现类似其他宇宙寿命的一个时代:100亿年前可见的宇宙及其包含的物质必然和现在大不相同。我们此时此地所了解的具有它的物质、它的恒星和行星、它的星系和星系系统的这个世界,自从存在以来,历经的时间以千万年计。更早些时候的世界是什么样子,今天没有人知道。物质、星球和星系凡此种种,我们今天知道的是这个过程大概经历了150亿年的样子。如把宇宙的年龄当作一天,那么,自有人类到现在为止仅仅只有10秒钟而已。

1948年美国物理学家伽莫夫等人又提出了大爆炸宇宙理论,他们把物理学知识和宇宙膨胀理论结合起来以解释化学元素的起源。他们认为宇宙始于150亿年前的一个高温、高密度的"原始火球",初始温度高达几十亿度,后来降到十几亿度,然后火球爆炸了。原始火球内部因爆炸而向外膨胀,辐射温度和物质密度迅速下降,于是核反应停止。其间所产生的各种元素就形成了今天宇宙中的各种物质,在膨胀过程中,辐射物质逐渐凝聚成星云,进而演化成今天宇宙中的各种天体。他们预言由于大爆炸后宇宙中原始的辐射达到热平衡,必定还残留着背景辐射。1965年美国贝尔电话实验室的两位射电天文学家彭齐亚斯和威尔逊发现并证实3.5 K的宇宙背景辐射。20世纪80年代末期英国格林尼治天文台的观测也证实了这个预言,这无疑是对大爆炸理论的有力支持,从而使"大爆炸宇宙论"被广泛接受而确定,成为公认的宇宙标准模型。

这里,我们再把"时间"的概念更具体化,让读者有一个可以比较的直观认识。

耳朵能辨别的最短时间间隔	0.1秒
日	8.7×10^4秒
人的寿命	10^9秒~100年
人类文明	10^4年
人的发展	10^5年
地壳重大变化	10^5年
哺乳动物的发展	10^5年
生命的发展	10^5年
许多岩石的年龄	2×10^9年
地球的年龄	4.5×10^9年
最靠近我们的星(包括太阳、地球)所构成物质的年龄	$(5\sim10)\times10^9$年
宇宙的年龄	$(10\sim20)\times10^9$年

至此,我们讨论了人类在这个世界空间、时间位置中所处的

地位。只有正确认识这些,才能对进一步学习物理知识有个良好的开始和合适的出发点。

本节结束前,把一幅宇宙"日历"提供给读者,让大家更能清楚我们在时间发展中的位置(图 1.12)。

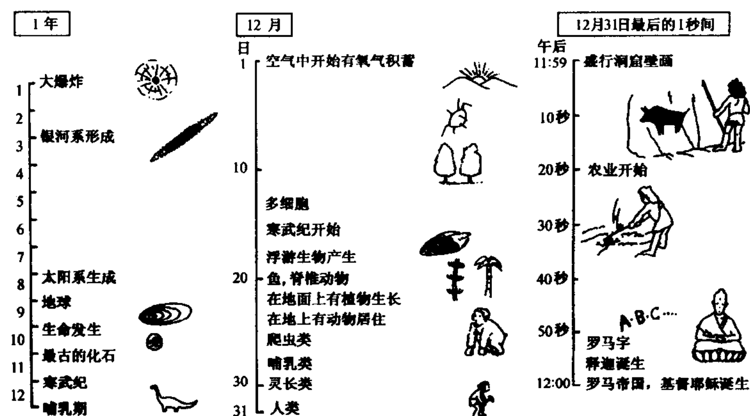


图 1.12 趣味的宇宙"日历"

将从宇宙开始到现在约共 150 亿年,以此作为 1 年来编出一个年历的情况

1"天"=4110 万年 1"小时"=171 万年 1"分钟"=28 900 年 1"秒"=482 年

1.3 现实社会中的人类

社会发展蕴藏着人类生存的危机

20 世纪末,人类都在讴歌人类社会取得的巨大繁荣,科学技术取得的重大进步。的确,尤其近几十年的科技进步真是令人吃惊。但是,我们也不能不正视由于工业生产的不断进步使地球圈内发生了巨大变化,比如地球温暖化问题,大家都在注视着 CO_2 含量的变化给地球带来的温室效应的情况。从 CO_2 的含量来看,产业革命时期大气中 CO_2 含量为 0.028%左右,现在的含量是 0.035%,估计 21 世纪中期将达到 0.04%。再者由于科学的发达新的化学物质每年以数万种产生出来,其中有几百

种付诸实际应用，现在有记录可查的化学物质已达 1000 万种以上，其中强辐射性的物质和剧毒物质也有很多种。现在，人类发展的基础中重要的一环是地下资源的利用。从 20 世纪下半个世纪开始，人类很大程度上是依赖石油资源，石油资源已有 700 亿吨被开采出来了，现在消费量年年递增。根据地质资源推测，总资源量为 3000 亿吨，这当中还有一部分尚未被发现，而现在已发现的埋藏量是 900 亿吨！所以即使以总资源量来定，已经有 1/4 被开采消耗了。除此之外，由于工业的发达，科技的进步，人类的活动中也出现重大的变化，例如，由于医疗条件的改变，生活的安定，世界人口急剧增加，2000 年世界人口总数已达到 60 多亿，再如，能量的消耗量在急剧上升，信息量也大量增加，交通越来越方便。1987 年英国出版的 Gaia Books 中就形象化地用图(图 1.13)作了表示。图中需要详细说明的一点是，19 世纪初，世界人口才超过 10 亿，20 世纪初就达到十几亿了。1950 年全世界人口

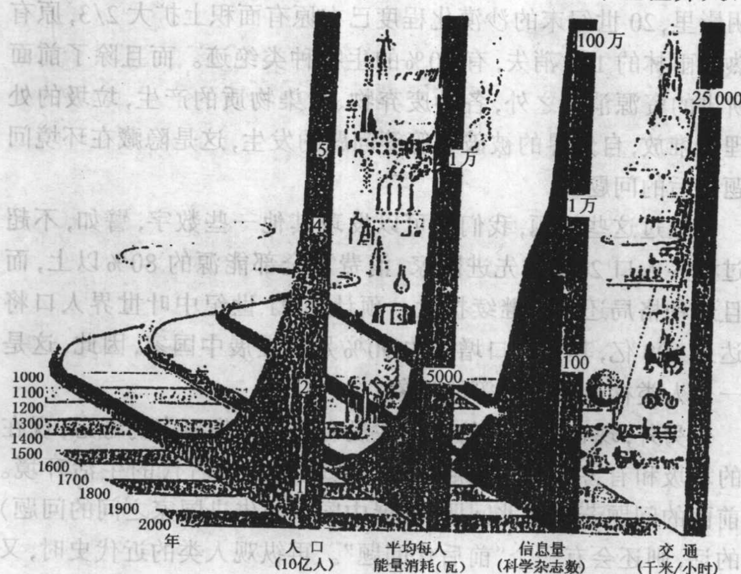


图 1.13 人类活动发生重要变化的示意图

为25亿,到了1987年就超过50亿了,每年以900万人的速度急剧上升,预测21世纪中叶将要超过100亿。人口的增长就意味着物质指数的变化,尤其二次世界大战后的几十年中增加更为迅速。以煤炭、石油、燃料使用来说,20世纪以来总共使用量增加了12倍。若以1980年时的美元价格来换算,世界的总生产量1900年为0.6百万美元,1986年为13.1百万美元,增长了近22倍,而且4/5是1950年以后的需求。

社会发展的情况不能不引起科学工作者重视,但是这类问题,绝不是一个简单的仅由自然科学家都能解决的问题,它牵涉到的问题的深度、广度决非简单的数字指标所描述的,它隐藏着贸易问题、国际法问题、国际关系问题等许多问题,还涉及文明观、价值观等问题。

人类文明史正处在大繁荣时期,同时也应看到臭氧层已被破坏,温室效应、大气和水的污染等问题相当严重。在这繁荣的阴影里,20世纪末的沙漠化程度已在原有面积上扩大2/3,原有热带雨林的1/3消失,有20%的生物种类绝迹。而且除了前面所讲的资源消耗之外,各种废弃物、污染物质的产生,垃圾的处理与堆放,自然界的被破坏等等问题的发生,这是隐藏在环境问题之后的问题。

透过这些问题,我们又可以发现其他一些数字,譬如,不超过世界人口20%的先进国家,消费了全部能源的80%以上,而且这种格局还只会继续扩大。预计到21世纪中叶世界人口将达到100亿,其中人口增加的90%是在发展中国家,因此,这是一个人类社会极不平等的现象。

另外,现在生活着的人们并没有为后代作更多的考虑,现在的垃圾和有害物质、污染等都严重影响人类后代的生活环境。前面的问题若是南北问题(发展中国家与先进国家之间的问题)的话,则还会有一个“前后代问题”。再纵观人类的近代史时,又可发现资本主义、帝国主义的经济发展,会受经济利益和资源制约并会影响它的发动侵略、发动战争行为。这也意味着21世纪

中，由于经济上的各种利害冲突，环境、资源问题的制约，对抗、抗争，乃至战争的可能性也仍然存在。作为资本主义社会经济的重要特征，它要不断扩大它的支配权力，私有制的强烈占有欲和为了利润而去发展、探索，也会给人类社会带来许多问题。因此，作为科学工作者，不论他是自然科学工作者，还是社会科学工作者，都有必要去认清自己在当前社会中的位置，自己的立足点，同时应该深入地把自己的工作和社会现实问题结合，担当起自己应该承担的职责。

人类生存危机与科学工作者的职责

上面我们已经叙述了在人类文明的阴影里隐藏着对人类社会可持续发展和对人类继续生存的巨大危机，当然这里我们不能对许多问题一一叙述，我们只从公害的输出和转移的问题作些讨论。由于先进国家和发展中国家的发展不平衡，发展中国家往往希望得到先进国家的技术上的援助，但是，在得到援助的同时往往又出现了公害的输出和转移，以及一方面是“省能”，另一方面则是加倍的“费能”的问题。发展中国家的电镀工厂的废液、蓄电池的铅、镉引起的污染，以及其他重金属及有害废弃物的污染等问题都是令人不安的。这就是说，发展中国家把先进国家的有关技术引进的同时，相应地也引进了氰化物污染、重金属污染等问题。再如铝的精炼工程是需要大量电力的，先进国家把这些转让给发展中国家，又造成了发展中国家能量的过量使用，加之技术上的问题，往往是更加费能。这里再以臭氧空洞问题为例，做一个较为详细的讨论。所谓臭氧“空洞”，并不意味着出现了“空”的“洞”，在“空洞”中臭氧已不存在，而是臭氧浓度远低于正常水平。图 1.14 是近二十年前的几年内拍摄的南极上空的臭氧层空洞的情况，图中的数字表示浓度大小，很明显，从图中看到可见浓度减少区在扩大。

根据研究结果可知，臭氧层空洞的增加是与氟利昂的生产和向大气层中泄漏有直接关系的。世界气象组织 1999 年的报道说，该组织从南极和阿根廷探测基地获得的数据显示，与

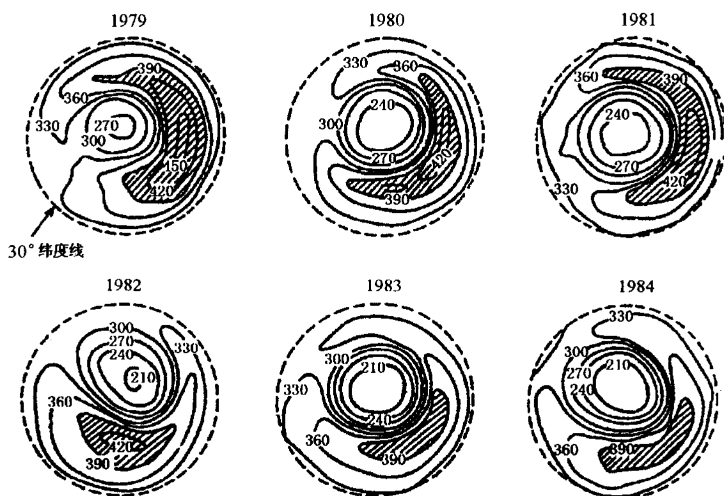


图 1.14　南极上空逐年的臭氧浓度变化图

1997 年相比,“空洞”已大出了 15%,而且发展趋势是还将继续扩大。大气臭氧的损耗涉及相当复杂的化学反应过程,并与臭氧层所处高度上的温度,水汽含量和阳光照射有关。但科学界一个相当流行的观点是,人类活动,尤其是向大气中释放某些工业气体是一个重要的因素,其中普遍认同的是被称为含氯氟烃类的化合物。这就是目前用得最广的制冷剂、清洗剂和发泡剂,其中氟里昂对臭氧的破坏作用尤为显著。为此,1985 年在加拿大蒙特利尔签署了一份公约来约束各国以逐步禁止并淘汰此类产品。但是主要先进国家为了本国利益而大量生产的氟利昂,严重影响了人类的生存。

和环境问题相关的问题,实际上是一个全球性的社会关系问题、与国际关系与国际法相关的问题,如何看待这个问题呢?下面举几种国际上典型的意见介绍给读者:

(1) 技术乐观主义论。持这种论点的人认为人类的能力和技术进步是无限的,他们提倡自由主义经济,认为环境问题和市场结构会自动达到一定的平衡。他们认为首先是搞开发,然后

再考虑环境等安全问题，这实际上是一种功利主义的观点，是为先进国家作辩护的。

(2) 调和型开发主义。持这种观点的人认为在合适的环境管理的基础上保证保护环境。问题是应该两全的，并认为在法制、税制、社会制度等方面综合考虑更为合适，他们认为应该从合理主义、公平性的立场上综合考虑本国和外国的利益和环境问题。

(3) 地区自主保护主义。这种想法并未涉及问题本质，他们认为，环境问题的产生是由于中央集权，大规模开发，大规模技术应用等集权体制所造成的，若是地区自主，采用适当的技术，一定的规模，在不破坏环境的基础上进行开发，以保证该地区的生态平衡，这种方法是可行的。他们认为兼顾生态平衡的保护和地域地区的发展，兼顾地区、个人的利益是可以办得到的。这也是一种调和型的开发主义的想法。

(4) 自然中心主义。他们认为，不应趋于超越地球、超越自然、超越人的能力，人们的生活应与自然环境相适应，也就是人类要适应自然生态，要保存自然生态，这是人类活动的准则。

尽管其他各种各样论点很多，但是自然环境被破坏的速度并没有因此而降低，因此，作为科学工作者，考虑问题就应看得远些，兼及各种问题。实际上，经济的成长，国家的发展，人民的安居乐业，也不是单单一个保护环境所能包含的问题，经济发展、社会治安、政治稳定也是和它相关的。因此，对社会科学工作者而言，就有着很重的责任，应从社会发展，国家开放，技术引进与环境保护，健全法制等许多问题来考虑才行。如前面所讲的技术引进与环境污染的问题就应有一定法制管理和制约，对于臭氧层空洞问题，我们不仅应从自然科学立场去研究补救办法，并在对产生后果的预防等方面进行工作，同时，我们也应在国际讲坛上为健全国际法规，制约不法国家和企业等做出自己的努力。

1.4 有限资源、有限地球环境制约下，人类历史进步的新思考

1995年日本出版了古泽祐教授写的一本《从环境到社会发展》的书，书中对当今先进国家在发展中对全球生态环境的影响提出了深刻的看法。他认为，无限制地追求经济增长与其所造成的环境恶化问题是不相容的，高度经济增长的阴影下大气、森林、土壤等环境被剧烈破坏，严重的公害正在威胁着人类。作为世界上最大的木材输入国日本，国内的绿化保护得较好，却从南洋大量进口热带木材，连日本人也不得不承认日本是"吞食森林之虫"。过量的采伐，使热带雨林生态出现不平衡，使那些国家的农作物存在很大的潜在危险，在日本国内又造成了森林工业的不景气，山村的衰退，许多地方被大量开发为高尔夫球场和产业废弃物堆放场等，出现了新的危机。现在的社会只要某处出现一点波动就会危及全球。书中以粮食为例，举出了一些具体的事例来作说明。1993年日本"冷夏"造成了大米大歉收，紧急从世界市场大量购进大米，引起了世界大米市场的大混乱。大米市场是自给性较强的市场，规模一般较小，这样一来就把供需平衡打破了。又如20世纪80年代初韩国紧急输入大米200万吨，也引起大米市场的大波动；再如到1988年为止向世界大米市场年输出100万吨的中国，由于1989年歉收相反要输入120万吨，这样一出一进给世界市场也造成了很大影响。

再如，世界上最大的玉米生产国美国，第二次世界大战后单位面积产量提得很高，1980年的单产达到战前的5～6倍，但在这个顺利生产并逐步扩大的道路上却敲起了一次警钟。由于70%是近亲交配成的五个品种，遗传基因相同，结果在1970年出现了一次枯黄病，蔓延到很大的地区，生产量减少了15%，结果使当年的玉米价格大升。所以当前社会从粮食、资源等等问题而言是一个脆弱的繁荣和稳定，到2025年世界粮食的需求量

就是现在的 1.7 倍，要达到 7.65 亿吨，其脆弱性就更加明显了。书中提出了应该重新考虑社会经济系统的组成，这是一个涉及政治经济学的大问题。

该书又指出，欧洲的中北欧地区，丹麦、瑞典、荷兰等国，从"公"的角度，自下而上以"私"为基础而组织成"共有的"多种多样的交流活动，开展得很好，以此为基础形成了社会保障制度的"公"有制，也就是自下而上的"共有"的形式的积累，使"公有"的形式在社会中占有很多位置，构成了社会的组织系统，它充实了社会福利、医疗、劳动者的权益保障等领域，而且一些与企业、国家组织相独立存在的非营利组织(NPO)、非政府组织(NGO)等在社会组织系统中起到了很重要的作用。值得注意的是即使处在资本主义社会中心地位的美国，这种超越"私"的动机的各种活动也开展得很活跃，开展了一些和市场经济对抗的经济活动，出现非商品化经济活动和非市场化经济，家庭经济和近邻相互交换交流的直接交换活动。近年来这些活动不仅在他们国内，而且在国际舞台上也很活跃，如对难民的支援，地球环境的讨论等，使大家都意识到"人类只有一个地球"，从"地球人"的角度来考虑问题的人群数日渐增加，"共有的问题"，共有社会的建立应是全球追求的目标。

书中提出，作为现阶段，首先应以环境问题为突破口，从"大量生产—大量消费—大量废弃"的产业社会的桎梏中摆脱出来，建立"生产—流通—消费—还原废弃"相互关联的社会。作者认为，人们不能把自己封闭在经济、社会活动中，仅以个人物质追求和个人方便为目的的狭窄的精神世界中，各行其是，要为当前面临的人类发展的新课题而努力，以"人与人"、"人与自然"的关系出发去构筑新社会。这应是 21 世纪人们面临的最大的课题。

作为一名置身资本主义社会的社会科学家，仅从环境、科学、资源等问题出发发现整个社会的政治问题，虽有见地，但也有不少片面、偏颇、局限之处。相比之下，作为我国新一代的社会科学工作者，更应感到自己责任的重大，认识自然科学知识对

我们的重要，我们要对21世纪的人类社会各种问题提出中国学者的观点和解决办法。

第二讲　物理学发展史上的首次大综合及物理学发展初期的几种思辨方法介绍

2.1　中世纪宗教势力的专横与亚里士多德经院主义哲学体系的禁锢

在古代，自然科学并没有从哲学中分离，古希腊、古罗马时代自然科学家也就是哲学家。宇宙的本源是物质还是精神，这是宇宙观的基本问题。以苏格拉底和柏拉图为首的唯心主义学派认为，宇宙的创立出于有目的安排，给人眼睛是为了看东西，给人耳是为了听声音。如果不给我们鼻子，那么香味有什么用处？如果不是舌头来品尝甜、酸和可口滋味，那么对这些滋味会有什么知觉呢？而这些安排都是神的作用。柏拉图是苏格拉底的弟子，他认为真实的知识源泉是灵魂对理念世界的回忆，这是一种理念神秘主义。

公元前 9 世纪古希腊诗人荷马的著名诗篇《伊利亚特》和《奥德赛》中就记载着丰富的传说与神话。公元前 8 世纪希腊诗人肖特的《神谱》一诗，记载了关于宇宙创生的传说：第一个出现的是一张张开的大嘴，接着是胸膛宽博的大地，而后是爱神爱罗丝。大嘴生出阴间和黑夜，黑夜怀胎，产生明亮的天空和白昼，大地诞生出有星星的天空，天穹笼罩大地使之永恒不动摇；大地还生出高山和大海，山上居住喜爱山林的半神半人的女神们……从公元前 6 世纪到公元 1 世纪，宇宙学曾有过不少学派论争，但进入中世纪后则沦入神学深渊，地心说主宰一切。

公元 4 世纪，罗马帝国把基督教定为国教，由于政教合一，亚里士多德的宇宙观很自然地与之融合而产生了经院主义的哲

学体系，亚里士多德的宇宙观，认为天上是分为许多等级构造，各有尊卑优劣；地上也有法老、主教、皇帝等尊贵的至高无上的权威，他们统治了天上人间（图2.1）。当然，意识形态也就以此为标准了，经院哲学和神学占了统治地位，人们稍有不

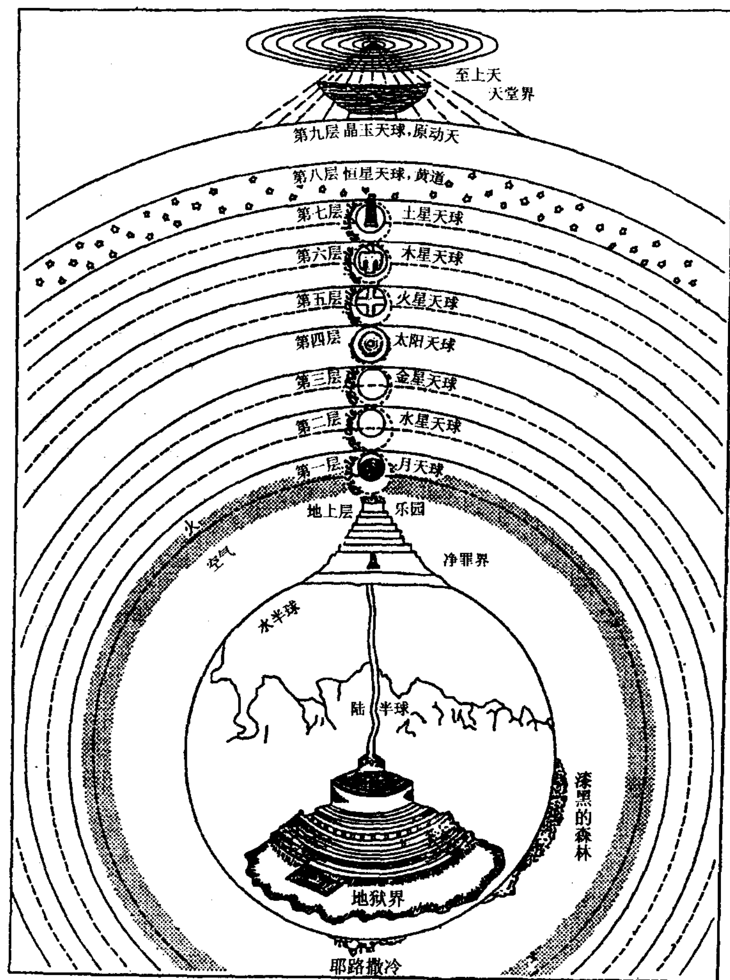


图2.1 中世纪的位阶构造图

逊，或有对抗宗教的言行都被视为大逆不道、异端邪说，有的要被送往宗教法庭受审，布鲁诺就是典型的一例，这将在下面再详述。

远在古希腊时代，亚里士多德就提出二界说，即以月亮为界，月亮以上为神界，凡神界天体均作圆运动而不下坠，月亮以下为世俗界，凡俗界物体均下落运动。直到牛顿指出，月球不下坠是因为它有较大的横向速度的原因，但牛顿不能回答月球横向速度从哪里来的，他把它归于第一推动，即上帝给的。康德提出星云演化论和万有斥力来解释横向速度的来历，拉普拉斯指出了康德的错误，提出横向运动来自角动量守恒。

实际上，在西方，人类认识宇宙自然有两大领域，一是科学，二是神学。凡是科学不能或暂不能证实的领域就被神学占领。例如，标准宇宙学涉及宇宙的初始条件，即宇宙第一推动，谁是万能的主宰给出了宇宙的初始条件？自古以来，科学无法回答这个第一推动的问题。这为西方中世纪神学家维护上帝存在的信仰提供了一种凭据，当时的教会还对那些企图对此有所怀疑的人加以钳制。

意大利著名的天文学家布鲁诺就是被宗教迫害致死的科学家。1548年，布鲁诺生于意大利那不勒斯诺那城一个没落小贵族家庭，家境贫困，他未能上大学。15岁在一所修道院做工。在那里他阅读了大量的书，1572年，他成为一名牧师，并获得哲学博士学位。这时他对自然科学发生了兴趣，从而对宗教神学产生怀疑。由于批判《圣经》，他受到宗教法庭通缉，流亡异乡，曾在法、英、德、捷克等国讲学，反对宗教哲学及托勒密的地心说，宣传哥白尼的日心说。这引起了罗马宗教裁判所的恐惧和仇恨。1592年罗马教徒采用欺骗手段把他骗回意大利，并立即逮捕。刽子手使尽了种种威胁利诱手段，但布鲁诺坚贞不屈，遭受了8年的折磨，最后被神学家处以火刑，1600年2月17日被烧死在罗马的鲜花广场。布鲁诺大无畏地捍卫了真理，藐视反

动的宗教法庭，在生命的最后时刻，庄严地向刽子手宣布："你们对我宣读判词，比我听到判词还要畏惧！"在布鲁诺遇害289年之后，人们在殉难的鲜花广场上，树立起他的铜像，永志纪念。

布鲁诺以生命捍卫并发展了哥白尼的日心说，他认为宇宙是无限的，在太阳以外还有类似的天体系统；太阳只是其中一个天体系统的中心，而不是整个宇宙的中心；太阳不是不动的，它对于其他恒星的位置也是变动的。

宗教神学对科学家的迫害一直延续到17世纪。哥白尼的不朽著作《天体运行论》直到他临死前才出版。滑稽的是一位署名"无名氏"的奥西杰神父为这部书写了个序，序言中说："此书所提出的不是一桩科学事实，而只是一套闹着玩儿的幻想。"但不知此序言是妄图贬低巨著的伟大意义，还是为了愚弄出版当局的检查。1632年另一位天才的意大利天文学家、哲学家、数学家和物理学家伽利略出版了他的《关于两大世界体系的对话》，这本书才出了几个月，伽利略就被召到罗马受审，主教团判决：(1)《对话》是禁书；(2)三年里，他必须每周背诵七篇忏悔书；(3)他被无限期监禁在家中。当时伽利略已年逾七十，当他被迫在判决书上签字时，心里默念着："可是，地球还在转动着啊……"伽利略在监禁中完成了另一部书《关于两种新科学的对话》，1637年在荷兰秘密出版。爱因斯坦评论说："伽利略的发现以及他所用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。"1979年11月10日罗马教皇在公共集会上承认伽利略在17世纪30年代受到的审判不公正的。1980年10月，教皇又在梵蒂冈举行的世界主教会议上提出重新审理这个冤案，伽利略的沉冤昭雪，说明了真理是不可抗拒的。

尽管亚里士多德被奉为圣贤，他的学说在中世纪还是不断有人批驳，逐渐被新的见解所代替。6世纪希腊有一位学者对亚里士多德的运动学说持批判态度，他叫菲洛彭诺斯(J. Philo-

ponus)。他认为抛体本身具有某种动力，推动物体前进，直到耗尽才趋于停止，这种看法后来发展为"冲力理论"。代表人物是英国牛津大学的奥康（William of Ockham, 1300—1350），他认为，运动并不需要外来推力，一旦运动起来就要永远运动下去。他写道："运动并不能完全与永恒的物质区分开，因为当可以用较少的实体时，就无需用更多的实体……没有这一额外的东西，就可以对各种运动给予澄清。"例如，关于抛射体运动，他解释为："当运动物体离开投掷者后，是物体靠自己运动，而不是被任何在它里面或与之有关的动力所推动，因为无法区分运动者和被推动者。"他举磁针吸铁为例，说明要使铁运动并不一定直接接触，并且还进一步设想，这种情况在真空中也能实现，可见亚里士多德认为真空不存在的说法是可疑的。

当然，奥康的说法并不等于惯性原理，但这却是走向惯性原理的重要步骤。因为，如果运动不需要原因，一旦发生就要永远持续，亚里士多德的推动说就要从根本上受到动摇。

巴黎大学校长布里丹（F. Buridan, 1300—1358）也是批判亚里士多德运动学说的先行者。他反对空气是抛射体运动的推动者，亚里士多德对抛射体的解释是：在抛射体的后面形成了虚空区域，由于自然界惧怕虚空区域，于是就有空气立即填补了这一虚空区域，因而形成了推力。布里丹反问道："空气又是受什么东西的推动呢？"显然还有别的物体在起作用，这样一连串的推动根源何在呢？他又举出磨盘和陀螺为例，它们推动时无前后之分。两支标枪：一支两头尖，另一支一头尖一头钝，然而投掷时并不见得前者慢后者快。水手在船上，只感到迎面吹来的风，而不感到背后推动的风。这些都说明："空气持续推动抛射体"的说法不符合事实。于是他提出"冲力理论"，认为："推动者在推动一物体运动时，便对它施加某种冲力或某种动力。"

布里丹的工作有两位继续坚持了，一位是阿尔伯特（Saxony Albert, 1316—1390），另一位是奥里斯姆（Nicholas Oresme, 1320—1382），他是布里丹的学生。他们发展了冲力理论，阿尔

伯特运用冲力来说明落体的加速运动,认为速度越大,冲力也越大,他写道:

"根据这个(理论)可以这样说,如果把地球钻通,一重物落入洞里,直趋地心,当落体的重心正处于地心时,物体将继续向前运动(越过地心),因为冲力并未耗尽。而当冲力耗尽后,物体将回落。于是将围绕地心振荡,直到冲力不再存在,才重又静止下来。"

请注意,阿尔伯特这个例子在后来伽利略的《关于两大世界体系的对话》中也有讨论,可见布里丹、阿尔伯特、奥里斯姆等人的早期工作为伽利略和牛顿开辟了道路。不论是伽利略,还是牛顿,都在自己的著作中留下了冲力理论的烙印。

2.2 物理学初始发展时期的几种思辨方法

16 世纪以后,由于航海、战争、工业生产的需要,力学的研究得到了真正的发展,但是,要批驳亚里士多德关于落体运动等的错误理论,要真正从经院主义哲学体系中,从亚里士多德精神枷锁下解脱出来是非常艰巨的,这是一场思想革命,这里,我们就不得不花一些笔墨来介绍物理学初始时期值得提出的几个问题。

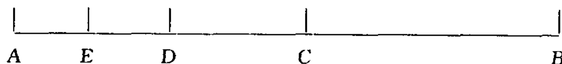
2.2.1 悖论的思辨方法

首先,我们介绍关于运动的悖论(paradox),这就是芝诺悖论。

芝诺(Zenon Eleates,约 490—436 BC)出生于意大利南部的埃利亚城,是古希腊埃利亚学派的主要代表人物之一。他是古希腊著名哲学家巴门尼德(Parmenides)的学生。芝诺极端信奉巴门尼德关于世界上真实的东西只能是"惟一不动的存在"这个信条,否定现实世界的运动,认为运动或变动是不可能的,并断言承认运动就会导致矛盾。芝诺以诡辩的方式阐述他这一学派

的观点，其中芝诺的关于运动的四个悖论，最为闻名。希腊人从未认真对待和真正解决芝诺的悖论。100年后的亚里士多德竟断言芝诺是个怪家伙，责备他犯下了为希腊哲学界视为最属大逆不道的行为——诡辩。这四个关于运动的悖论引起了学术界极大的骚动，其余波一直至今尚未完全平息。芝诺关于运动的四个悖论是这样的(据亚里士多德的转述)：

二分法 “运动不存在。理由是：位移事物在达到目的地之前必须先抵达一半处。”意思是：要通过 AB，必先要从 A 出发到达 C；要到达 C，必先要到达 AC 一半的 D；要到达 D，必先要到达 AD 一半的 E。如此进行下去，永无止境，所以得出结论：运动不可能。

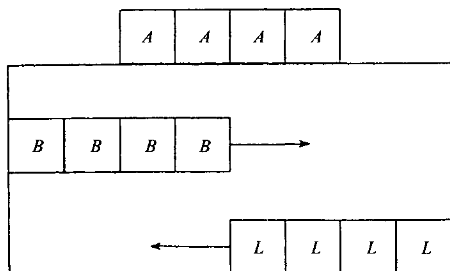


阿克琉斯论证 “这个论证的意思是说：一个跑得最快的人永远追不上一个跑得最慢的人。因为追赶的人必须首先跑到被追的人跑的出发点，因此走得慢的人始终永远领先。”意思是说甲的速度远大于乙，乙先行于甲：甲要超乙，必先要赶上乙先达到的 B 点，当甲达到 B 点时，乙已进到 C 点，当甲达到 C 点时，乙又进入了 D 点。如此下去，结论是甲永远赶不上乙。

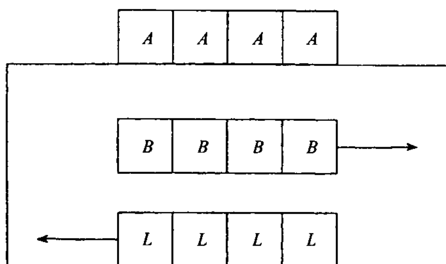


飞矢不动 “飞着的箭静止着”。飞箭在任一瞬间必静止在一确定的位置上。所以，运动就是许多静止的总和。

运动场问题 “跑道上有两排物体，大小相同，数目相同，一排从终点排到中间点，另一排从中间点排到起点，它们以相同的速度作相反的运动，芝诺认为这里可以说明：一半时间和整个时间相等。”如图，原来的排列是：



作相向运动后，变成这样的排列：



第一个 B 到达最末一个 L 的同时第一个 L 也到达了最末一个 B 处。这时第一个 L 已经经过了所有的 B，而第一个 B 只经过了 A 的一半。因此，一半时间和全部时间相等。（这里的引述是根据亚里士多德《物理学》中的内容。）

芝诺是揭示静止与运动、时间与空间的互相矛盾的第一批人之一。也许亚里士多德已经觉察到芝诺悖论（现在常说成"佯谬"）对他的威力，所以他对芝诺责难，认为他是个怪家伙。芝诺发现并注意到了运动的矛盾性，这个事实给以后的逻辑学、数学和哲学的发展带来了极大的影响。他的悖论的思维方式给了后人提示和影响。

在新旧学说激烈冲突并最终导致新学说代替旧学说的"科学革命"时期，从旧理论中引申出来的重要的"科学佯谬"，往往成为旧学说的送葬曲和新学说的催生婆。伽利略为了驳斥亚里士多德的运动理论而十分机智地从亚里士多德的理论结论中导出的"落体佯谬"，不仅对亚里士多德的理论进行了有力的"证

伪"和否定，而且提出了"物体的下落运动到底是如何进行的"这个重要问题；对这个问题的实验和理论的探讨，使伽利略得到了著名的自由落体定律，并进而接触到了力与运动的真实关系。最终把力学研究引上了正确的方向，导致了近代物理学中第一个完整的理论体系——牛顿力学理论的创立，成为近代物理学的真正开端。

亚里士多德在科学界的影响极大，被认为是古希腊最博学的人物，他的著作被当作古代世界学术的百科全书，流传下来的有关自然科学的著作，主要有：



亚里士多德
(384—322 BC)
希腊哲学家、生物学家（他总结了若干观察到的事实和实际经验，他的自然哲学支配了西方近两千年）

(1)《物理学》：讨论物体在时空中的运动；

(2)《论天》：讨论火、气、土、水构成万物，及物质发生毁灭的过程；

(3)《气象学》：讨论天象和气象；

(4)《生物学》：关于动植物分类及生态的知识。

在力学上，亚里士多德主要着眼于对"运动的原因"的探讨。他从神学目的论出发，将原因分为四种，即质料、形式、动力和目的，但是"后三者常常可以合而为一，因为形式和目的是同一的，而运动变化的根源又和这两者是同种的。……"因而实际上亚里士多德是将世界划分成两个方面，即质料和形式。他指出，要解答运动"为什么"发生，就必须根究到"质料"和"形式"。亚里士多德认为，物质性的"质料"只是"潜在的"一种"可能性"，是僵死的和被动的；非物质性的"形式"不仅可以独立于质料而存在，是"现实的"，而且是主动的，具有活动性的，它联系于目的和运动变化的根源，是推动者，形式高于质料。任何运动着的事物，必然都有推动者在推

动着它运动，但推动者也被推动着，如此追索下去，必然存在一个不带任何物质形式、不需要任何质料的最高的推动者。即“第一推动者”，“它是永恒的，先于其他而自身不动的推动者，可以作所有其他事物运动的根源。第一推动者必然是一个并且是永恒的。”亚里士多德根据这个观点考察机械运动，形成了他的运动理论。

亚里士多德认为，组成地面上物体的四种元素的本质差别，主要不在于它们的物质特性，而在于它们的自然运动的特性和在空间占据共特定位置的趋势。它们都有其本质上的轻或重，他写道：“我把那些在没有其他干扰的条件下总是向上运动的东西称作轻物体，总是向下运动的物体称作重物体。”各种元素都有回归到其静止的“天然位置”的趋势。土元素是绝对的重，它的天然位置在最低层；水元素是相对的重，它处在土的上面；气元素是相对的轻，它处在水的上面；火则是绝对的轻，它处在最高层。亚里士多德由此形成了他的“自然归宿”说：在不受外力的情况下，各种物体都会由于组成它的元素的本性而做回归到它的天然位置的运动，这种运动称为“自然运动”。重的物体竖直下落和轻的物体的竖直上升的运动就是这种“自然运动”。地面上任何物体的实际运动，取决于组成它的最大数量的元素的倾向。含土元素最多的石头必然向宇宙的中心坠落，主要由火元素组成的烟焰必然会腾空升起；水受热而形成的水汽，是由于吸收了大量的火元素而向上空升起；水汽在冷却中由于释放出火元素而恢复了水的优势特性，转而凝结降落到下面的位置。

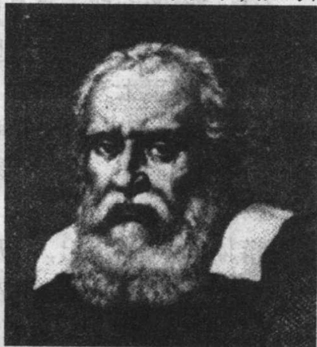
根据这种“自然归宿”说，必然会得出这样的推论：某一物体返回其“天然位置”的速率、完全取决于组成物体的各元素所占的比例，与占优势地位元素的数量成正比。比如，大的石块由于比小的石块含有更多的土元素，所以当这两块石头自由下落时，大石块比小石快得多；或者说经过相等的空间，重的东西比轻的东西落的时间要短一些。在《论天》这部著作中，亚里士多德明确写道：

“一定的重量在一定的时间内运动一定的距离；一较重的重量在较短的时间内走过同样的距离，即时间与重量成反比。比如，如果一物体的重量为另一物体重量的二倍，则它走过一给定距离只需一半的时间。”

在伽利略之前，亚里士多德的运动理论，特别是他的落体定律，已经受到不少人的怀疑，他们通过对运动情况的一般观察而得出了基本正确的结论。这些人的工作使长期被压抑的理智终于从对古代权威的屈从转化成一股不可抗拒的力量，发起了对亚里士多德的物理学的冲击，促使人们逐渐改变了对运动的观点。其中特别应该指出的是比利时著名的力学家斯台文(Simon Stevin, 1548—1620)于1586年出版的《静力学原理》的附录中所记载的落体实验。他写道：

“反对亚里士多德的实验是这样的：让我们拿两只铅球，其中一只比另一只重十倍，把它们从三十英尺的高度同时丢下来，落在一块木板或者什么可以发出清晰响声的东西上面，那么它们发出的声音听上去就像是一个声音一样。”

用直接实验证明亚里士多德的理论，这是十分有意义的，不过这个实验在很长时期内鲜为人知。后来流传很广的关于伽利略以“比萨斜塔实验”使经院哲学家们目瞪口呆的故事，很可能是一个张冠李戴地把斯台文的实验加于声名卓著的伽利略的名下的误传。人们只知伽利略而不知斯台文，这是可以理解的，因为正是伽利略的工作才使物理学的研究发生了根本性的变化。



伽利略(1564—1642)
意大利科学家

伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)于1638年出版的《两门新科学》，以三人对话的形式，生动活泼地讨论了物体运动和新力学问题。这三个人是代表

亚里士多德观点的辛普利邱，代表伽利略观点的萨尔维阿蒂和善于思考、不偏不倚的沙格列陀。关于自由落体的讨论，构成这本巨著的最精彩的中心内容，但它并不是直接从实验入手，而是首先从一个理想实验提出的"佯谬"对亚里士多德的落体定律提出诘难，逐步展示出他的研究的丰富内容。让我们来欣赏一下这场机智风趣的对话("萨"——萨尔维阿蒂；"辛"——辛普利邱)：

"萨：我十分怀疑亚里士多德确实曾经用实验检验过下面这个论断：如果让两块石块(其中之一的重量十倍于另一块的重量)同时从比如说 100 腕尺(aubit)① 高处落下，那么这两块石头下落的速率便会不同，那较重的石块落到地上时，另一块石头只不过下落了 10 腕尺。

"辛：他的话似乎表明，他已经做过这个实验了，因为他说：'我们看见较重的石块'；看见这个词证明一个大石块以(比如说)八的速率运动，而一块较小的石块以四的速度运动，那么把二者联在一起，这两块石头将以小于八的速率运动的要重。可见，较重的物体反而比较轻的物体运动得慢；而这个效应同你的设想是相反的。你由此可以看出，我是如何从你认为较重物体比较轻物体运动得快的假设推出了较重物体运动较慢的结论来。

"辛：我简直不知如何是好了……"

在最后辛普利邱也只是说"我简直超出了我的理解力"。这就是著名的"落体佯谬"，地地道道的一个科学"悖论"，它一下子就揭示出了亚里士多德落体理论的破绽和逻辑混乱；它同时也表明了，运用理想实验的推理法，比起永远可以被人挑剔指责的大量真实的实验来，会更容易、更有说明力地推翻一个包含着错误的理论。

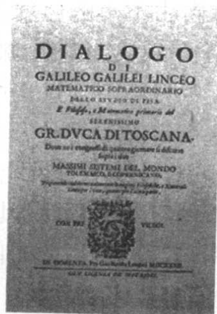
"落体佯谬"的提出，以极其尖锐的形式揭示了亚里士多德落体定律的谬误。那么，落体到底是作什么样的运动呢？对自由落体运动呢？伽利略卓越地运用了一套理性思维和实验检验相结合的方法，对自由落体运动的具体形态作了正确的描述，并

---

① 1 腕尺 = 20 英寸，1 英寸 = 2.54 厘米。

把它纳入到一个更为普遍的运动理论体系之中，为新力学的建立奠定了基础。





伽利略《对话》一书的封面

2.2.2 理想实验——理性思维与实验检验相结合的方法

伽利略认为绝不能以对自然事件简单的直觉性掠察和理会作为创立假说和构建理论的基础。

其实，伽利略注意到在实际的下落实验中，轻物体确实落后于重物体，但这是由于空气的阻力造成的。他是怎样确信在真空里所有物体下落得同样快的呢？他设想了一个实验，用铅、金和木做的三个球。他在设想中让这三个球在水银、水和空气里下落。在水银里，只有金球往下落。在水里金球和铅球往下落，而金球下落得比铅球更快。在空气里所有三个球都下落，这时金球与铅球速度没有差别，只有木球下落得稍慢一些。

接着，他作了如下巧妙的论证：我们从事实上觉察到重量不同的物体在媒质中下落时，它们之间速度的差别是随媒质的密度减小而减小，而且在媒质非常稀薄时这一差别非常小以致不能被觉察，于是就得出了物体在真空里下落情况的重要结论。他在《两门新科学》中写道："鉴于这点，我认为如果人们完全排除空气的阻力，那么，所有物体将下落得同样快"。

人们称他的这种推论方法为“外推法”。推论的结论应由实验来证明。当时的技术水平还不能得到真空。今天，我们在“抽空”了的玻璃管中作铝片和鸡毛同时下落和演示，来证明在真空中不同物体自由下落的速度都一样。

在确立了落体定律后，伽利略开始研究自由落体运动的规律。他一度曾设在下落过程中物体所得到的速度与下落的距离成正比。这个定义似乎是合理的，但他很快发觉这个定义会导致谬误。他说，设想物体在落下第一段距离后已得到某一速度，那么在落下的距离加倍时，其速度也将加倍。如果真是这样，物体通过这两倍距离所用的时间将和穿过原来那段距离所用的时间一样，这同客观事实不符。于是他转向了第二个假设，在下落过程中物体所得到的速度与下落的时间成正比而均匀增加。

这一假设是否符合自由落体运动的实际情况应该通过实验来检验。然而在伽利略时代没有任何记录快速运动的仪器来直接测量下落物体速度的增量与下落的时间间隔是不是成正比，即 $\Delta v/\Delta t$ 在整个下落过程中是否为恒量。而当时只能测量距离和相应的时间，正是由于这个缘故，他首先讨论了距离和时间的关系。他用图解法证明了下述定理：一个从静止开始作匀加速运动的物体在一段时间 t 内所通过的距离 s，和在这段时间里以末速度 v 的一半作匀速运动所通过的距离相同即 $s=\frac{v}{2}\cdot t$。他用图解作出说明，见图2.2，AB 表示时间 t，横线如 DJ、BE 等表示各时刻的速度，面积 ABE 表示在 t 时间内所通过的距离。这个面积显然与矩形 $ABFG$ 的面积相等。D 为 AB 的中点，故 FB 作为末速度的一半，即平均速度。由图示不难得出，三角形面积 $S_i=\frac{v_i}{2}t$。由相似三角形对应边成正

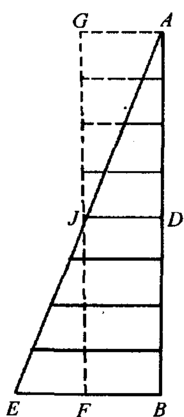


图 2.2　伽利略关于匀加速运动的图解法

比有 $v \propto t$，因此可得物体通过的距离与时间的平方成正比。即

$$\frac{s}{t^2} = 常量$$

在用了上述理论分析后，伽利略就力图用实验来验证这一关系。在伽利略时代没有记录快速运动的仪器，要直接测量迅速下落的物体各瞬时对应的位置是很困难的。何况当时伽利略甚至连一座记录快速运动的好时钟都没有。今天，我们可以用高速摄影机通过多次闪光摄成的物体自由下落的照片，记录物体下落时的相继位置，据此可以画出距离对时间的曲线。从这个图线能计算出瞬时速度-时间图线所需要的数据，然后我们就能检验关于在整个运动过程中 $\Delta v/\Delta t$ 恒量这个假说。

由于不可能对迅速的自由下落进行实验，伽利略以独特的方式作了这样的考虑：根据某一假设所得到推论如果严格符合实验结果时，该假设的真实性便得到了确证。首先他经过分析确信一个沿光滑斜面滚下的球与自由落体遵从相同的法则，简言之，它是“冲淡了的”或“减缓了的”自由落体运动。如果发现光滑斜面上滚下的球是匀加速运动，那么一个自由落体的运动也必定如此（尽管加速度的数值不同）。于是他把注意力转向斜面实验：

“我们取长约 12 腕尺，宽约半腕尺，厚约三指的一根小枝条，在上端面刻上一条一指多宽的直槽，里面贴上羊皮纸，使之尽量平滑，以便一个由最硬黄铜制成的坚硬的光滑圆球易于在其内滚动。抬高板条的一端使之处于倾斜位置并比另一端高一二腕尺，让圆球沿槽滚下，用测脉搏的方式记录下滚所需的时间并不止一次地重复这个实验，使两次观测的时间偏差准确到不超过一次脉搏的十分之一。经反复实验直到确定其可靠性之后，现在让铜球滚下的距离为全槽长的四分之一，测出下降的时间，这时我们发现它恰好为滚完全程所需时间的一半。接着我们对其他的距离进行实验，用滚下全程所用时间同滚下一半距离、三分之二、四分之三的距离或任何距离所用的时间加以比

较。这样的实验重复整整一百次，我们发现，铜球所经过的各种距离总是同所用的时间的二次方成比例，这对于铜球沿之滚动的各种斜度的槽都成立……”

实验结果表明：

a) 当斜面倾角 α 固定时

$$\frac{s_1}{t_1^2}=\frac{s_2}{t_2^2}=\frac{s_3}{t_3^2}=\cdots=\text{常量};$$

b) 当改变斜面倾角 α 时，$\frac{s}{t^2}$值也改变，α 从小到大，一直外推到 $\alpha=90°$时，$\frac{s}{t^2}$也等于常量，所以自由落体是匀加速运动；

c) 质量不同的物体沿相同倾角滑下，发现它们的加速度相等，这就否定了亚里士多德关于轻重不同的物体以不同的速度下落的学说。

需要说明的是，在当时的条件下，所用的机械钟很不精确，除了测脉搏外，还只能用大段时间的测量。伽利略巧妙地利用了古代人们所使用的滴漏来测量这一时间。

在伽利略之前，对于作用于物体上的力都是用静力学的方法来测定的。伽利略首先提出了力是速度变化的原因，创立了动力学概念，使力学和工程技术中的运动联系起来了。

1632 年，伽利略在《关于两大世界体系的对话》一书中，在论证地动说时，提出了他的惯性原理，从而驳斥了亚里士多德关于外力是维持物体运动(包括匀速直线运动在内)的说法。他构思了一个斜面理想实验(图 2.3)：沿光滑斜面下滑的物体将不断加速；沿光滑斜面上升的物体将不断减速；当物体放在一个既不向上又不向下倾斜的光滑表面上时由于不再有加速和减速的原因，物体将沿着这一无限长的平面永远运动下去。这就是说，物体的加速或减速是外力影响的结果，当一个运动的物体不受外力时，将永远保持它的匀速运动状态。

他在《两门新科学》中，又设想了另一个理想实验：一个物体由静止沿光滑斜面滑下，随后沿另一斜面上升时，最后将上升到

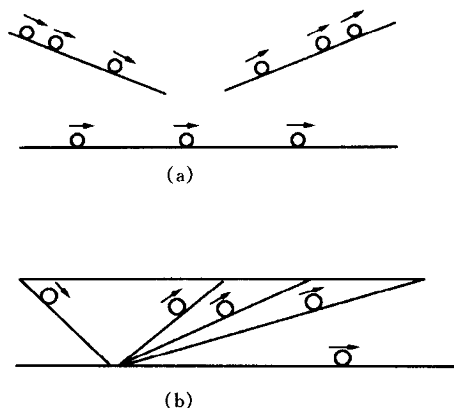


图 2.3 伽利略关于惯性运动的理想实验

它原来的高度。物体在上升的斜面上达到原来的高度所走过的距离随着斜面的坡度减小而增大。当坡度很小时，物体将走过很长的距离才能达到原来的高度。伽利略由此推论说，当这一斜面的坡度减小到零，即变为一个水平的平面时，物体将再也达不到原来的高度，因而物体将会永远向前运动下去了。伽利略在《两门新科学》中得出结论说：

"我们可进而指出，任何速度一旦施加给一个运动着的物体，只要除去加速或减速的外因，此速度就可保持不变；不过，这只是在水平面上发生的一种情形。因为在向上倾斜的平面上则有一减速因素。由此可见，在水平面上的运动是永久的；因为，如果速度是匀速的，它就不能减小或缓慢下来，更不会停止。"

就这样，伽利略形成了和亚里士多德不同的结论：物体的运动并不需要外力来维持，只有运动的变化才是外力作用的结果。物体不受外力作用时，将永远匀速地运动下去。但是，伽利略所讲的"水平面"是"各部分和地心等距离的"球面，所以，他所讲的水平面上的运动指的不是直线运动，而是"环绕一个中心的圆周运动"，所以不能算作"惯性定律"的准确表述。

伽利略在《关于两大世界体系的对话》中，曾经精彩地描述

过在一个匀速直线运动的船舱里发生的力学现象，并以此来论证：任何一个相对于伽利略所述的参考系作匀速直线运动的坐标系，在描述力学过程方面同伽利略系等效。这就是伽利略相对性原理，没有这个原理，后来物理学的任何重大进展都是不可能的。

坐标系是笛卡儿在描述质点运动位置时创立的数学框架。



笛卡儿(1596—1650)
法国哲学家、数学家、物理学家

笛卡儿(René Descartes 1596—1650)是法国杰出的数学家和哲学家，后移居国外。他出生于一个贵族家庭。从 8 岁到 16 岁在一个法国耶稣会学校读书。自幼身体孱弱，但却善于独立思考。17 岁时他到了巴黎，据说他“个性很强，足以抵御这个大都市的百般引诱”。1616 年获法学博士学位。他当过几年军官，随部队去过不少地方。1619 年，他产生了改革哲学的想法，因为只有数学看来才能引出肯定的结果，他是解析几何的创始人，所以他在进行哲学改革时是以数学作为范例的。他于 1637 年出版了其主要著作《方法论》及其附录《屈光学》、《气象学》和《几何学》，1644 年出版了《哲学原理》。

他努力于以机械方式来描绘自然界的普遍现象。在笛卡儿的哲学体系中，整个物理宇宙好比一个钟表机构。这架机器一旦建成并由上帝启动后，它将被设想为不再需要任何修理，或旋紧发条而可以无休止地运转下去(若有其他想法就可能意味着上帝是一个蹩脚的钟表匠!)。为了确保这架宇宙机器不致慢下来，笛卡儿论证说，一定存在一个运动量守恒原理。1644 年他在《哲学原理》第二篇第 36 节中写道：

“完全有理由假定，上帝在创造物质的时候，就赋予物质各部分以不同的运动，而且命名所有物质保持创造出来的那个时

候所处的方式和状态。所以，上帝也就命名这些物质保持着原来的量。”

把上帝这个观念作为论证的出发点当然是错误的，但是，笛卡儿这一运动量守恒的思想却是极重要的和深刻的。在同一节中，他解释了所说的“运动量”的含义：

“运动固然是被推动的物质的一种状态，但同时它也因此有种永不增减的量，虽然在物质的某些部分中有时候有所增减。正是由于这个原因，当一部分物质以两倍于另一部分物质的速度运动，而另一部分物质却大于这一部分物质两倍时，我们应该认为这两部分的物质具有等量的运动，并且认为每当一个部分的运动减少时，另一部分的运动就相应地增加。”可以看出，笛卡儿所说的“物质”实际上是“质量”，虽然他没有给这个概念以明确的定义。所以笛卡儿是以物体的质量和速度的乘积作为它的运动量的量度的。

笛卡儿认为没有外界的作用，任何粒子的状态不会有任何变化，根据这一思想他提出了惯性定律：

“运动的本质是：如果物体处在运动之中，那么如果无其他原因的作用的话，它将继续以同一速度在同一直线方向上运动，既不停下也不偏离原来的方向。”

这是准确的惯性定律的表述。他认为自然运动是在一条直线上进行的，这就突破了伽利略所设想的“水平面”的局限，所以一般认为《哲学原理》的出版是第一次提出了近代的惯性原理。笛卡儿这一论述开始是在一封信中写的，但是惠更斯在一篇题为《论碰撞作用下物体的运动》的论文中写道：“运动起来的物体，在没有反作用时，将以不变的速度沿直线继续运动。”这已经是以论文形式发表的惯性定律了。

惠更斯(Christian Huygens, 1629—1695)是荷兰的物理学家。他出生于海牙，1655年在法国获博士学位后，即转入科学研究。1663年成为英国皇家学会第一个外国会员，后又被接纳为法国科学院惟一的外国院士。他探讨了碰撞理论，求解了摆

的周期，测定了重力加速度之值，得出了向心力公式，建立了光的波动理论，他是近代自然科学的重要开拓者之一。

2.2.3 牛顿力学建立与机械观的形成

若要介绍牛顿力学的建立，这里先要介绍牛顿脍炙人口的名言，这就是他在一封给胡克的信中写道："如果我看得更远，那是因为站在巨人的肩上。"虽然这里他指的是胡克和笛卡儿，当然不言而喻也包括了他多次提到的伽利略、开普勒和哥白尼。其实他完成的综合工作是基于从中世纪以来世世代代从事科学研究的前人的累累成果。

牛顿将自己取得的成就，谦逊地归因于站在前辈伟人的肩上，才能看得远一些。这些前辈伟人，至少应该有以下四位：

欧几里得；伽利略；开普勒和笛卡儿。



欧几里得
(330—275 BC)
古希腊杰出科学家

欧几里得(Euclid，约公元前300年)古希腊的数学家，以《几何原本》著称于世。该书从一些定义、公理出发，通过演绎方法，建立了严谨的逻辑体系；早先以手抄本流传，他死后约700年才正式出版发行，到19世纪末已有1000多种版本，仅次于《圣经》。爱因斯坦曾经作出这样的评价："如果欧几里得未能激起你少年时代的热情，那么你就不是一个天生的科学思想家。"牛顿的巨著《自然哲学的数学原理》(以下简称《原理》)既用到它的几何知识，也仿效了它的体系和风格。

伽利略原本学医，却对欧几里得的几何学和阿基米德的力学极有兴趣，从而转向数学和物理学。有关他的工作，前面已作了不少叙述，这里再简要地说几点。他发现摆的周期性，运动的叠加性及惯性，重力加速度是恒定的等重要规律，并提出著名的力学相对性原理，常称为伽利略相对性原

理。这些工作奠定了动力学的基础，使力学走向精密科学。不过，伽利略并没有做过传说中的比萨斜塔实验（重物与轻物同时下落）；他所说的惯性运动，指的也不是匀速直线运动，而是圆周运动。由于伽利略积极宣传N.哥白尼的日心说，受教会迫害被判处终身监禁。有趣的是，直到20世纪90年代，梵蒂冈的教皇才为伽利略平反昭雪。

开普勒（J. Kepler, 1571—1630），德国天文学家。他信奉哥白尼学说，利用第谷（Tycho Brahe, 1546—1601）积累了20多年的天象资料及自己的观察结果，发现了行星运动的两条定律（1609, 1619）。牛顿的万有引力公式正是在开普勒定律的基础上提出来的。有关他的工作下面还将再作介绍。

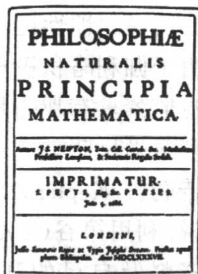
笛卡儿的工作前面已经作过介绍。这里再介绍一些他有关天体研究方面的工作。他努力于以机械来描绘自然界的普遍图像。为了说明天体运动，提出涡旋以太学说；正确地表述了惯性定律（1644），并且将它作为一条基本定律，确认物体的重量是外力；首次提出动量守恒定律（1644），但没有考虑到动量的方向性。笛卡儿对牛顿的影响是多方面的。他的《哲学原理》中也有自然界的三条基本定律，可以说，牛顿的运动三定律是对笛卡儿的修正。

除了向前人吸取思想经验之外，另一方面，牛顿也注意从同辈学者中吸取滋养，其中有物理学家C.惠更斯、R.胡克，天文学家E.哈雷、J.弗兰斯提德（Flamsteed, 1646—1719）等。不过应指出，牛顿心胸狭窄，难以与人交往，他与胡克、弗兰斯提德、G.W.莱布尼茨都发生过重大的争吵；在待人接物上，牛顿的名声是很不好的。

I.牛顿（Newton, 1643—1727）出生于英国一个不富裕的农民家里，那一年正好伽利略去世。牛顿是遗腹子，童年并不幸福，靠祖母抚养成人，这也许对他后来怪僻的性格有所影响。早先牛顿对占星术颇为爱好，1660年进剑桥学数学，就是“打算去试验合法的占星术”，他一生都很重视天文观测数据。牛顿从小



牛顿
(1643—1727)
英国数学家、物理学家、天文学家


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA
IMPRIMATUR
LONDINI

1687 年出版的的牛顿《自然哲学的数学原理》一书的封面

就对宗教有深厚的感情，其行为接近于清教徒，常有犯罪感，终生未娶。学生时代，牛顿广泛阅读了各类书籍，涉及天文学、数学、力学、光学、化学、神学以及炼金术等领域。他对《圣经》有很深造诣，甚至比许多神学家理解得更透彻；在牛顿的遗物中，有大量关于宗教的手稿。

牛顿的成就是多方面的，特别是，《原理》对人类作出了巨大贡献。此书于 1678 年出版，标志着力学作为一门严谨科学的诞生。它以若干公理和定义为基础，仿效欧几里得的风格，并且只使用了当时人们比较熟悉的几何方法，其中最主要的内容是有关于运动的三条定律、万有引力的论述及应用。

2.3 天体运动的日心说和开普勒行星运动定律

2.3.1 地心说与日心说

科学的发展始于观察自然界中与人类生产和生活关系密切的、最简单的现象。宇宙结构是为人类最早关心和探索的问题

之一。古代科学中最早发展起来的天文学就是从研究天体运动开始的。当时由于人们只能根据直观感觉的积累，凭借日月星辰在天空中运行的事实，形成了“地静天动”的天体运动观点。在西方，可以柏拉图的地心说理论为代表。

柏拉图(Plato, 427—347 BC)是古希腊哲学家，他在雅典建立了一个“学园”。在一次讲话中他提出：“天上星体代表着永恒的、神圣的、不变的存在，因此它们肯定沿着最完美的轨道以最完善的方式运动。最完善的运动是匀速圆周运动，因此，它们一定是围绕着地球作匀速圆周运动。”但是，实际观察到少数天体，如日、月、行星，它们的轨道看起来并不是圆周而且也不是匀速的，甚至在恒星的背景上行星有时要逆行。对此，柏拉图仍坚持匀速圆周运动。他认为这些不规则运动必定是完整的匀速圆周运动按某种方式组合的结果，于是他就向他的学生们提出了如下的任务：“如何把圆周运动组合起来以说明观察到的太阳、月亮以及行星绕地球的运动。”

柏拉图的学生欧多克斯(Eudoxus, 409—355 BC)就是用圆运动的组合来描述行星的运动(图 2.4)。他设想地球周围有许多层以地球为中心的透明同心球壳，每个球壳都可以绕着自己的轴旋转，而每个球壳的轴的两端的支点都固定在它的外面的球壳的内表面相对的两点上。各个轴的主面互不一致。最外面的最大的那个球是恒星天球，这个球每天绕着南北方向的轴旋转一次。于是人们就看到了恒星的周日运动。向里依次为土星、木星、火星、太阳、金星、水星和月亮。它们所在的球都各自以一定的速度旋转，同时被外面的球带着转动。适当选取各

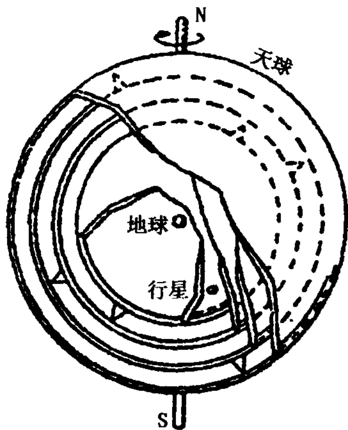


图 2.4　欧多克斯天体球

个透明球的轴的取向和旋转速度，它们配合起来后居然可以做到这些球上的五颗行星、太阳和月亮的运动和实际观察的结果粗略地一致。

大约在公元150年，也就是在柏拉图以后约500年，亚历山大城的数学家、天文学家托勒密(C. Ptolemy)发表了《天文学大成》(Almagest)一书，陈述了他的完善的地心体系，将"地心说"发展到了顶峰时期。他为了用匀速圆周运动说明行星的不规则运动，提出了一个由本轮-均轮、偏心轮、等距轮三种几何图形所组成的表示一组匀速圆周运动组合的精致模型。

托勒密通过调整有关的轴线运动方向、旋转的速率和半径，以及调整本轮、偏心轮和偏心等距点的数目和大小，利用历代天文学家们得出的部分结果，用拼拼凑凑的办法使其符合观察到的结果，终于凑出天体运动图形。

根据他的理论能够相当准确地测算出太阳、月亮和行星的位置，他的预言和实测的位置相差在2°以内，在以后的1400年间依然是天文学家、航海学家的有用工具。另外，由于该模型和人们的直观经验相一致，并且能令人欣慰地认为，人类生活在一个稳定不动的地球上，特别是后来又为教会利用来论证"地球中心"，"人类中心"的教义，所以这个体系在天文学上一直统治了1400年，直到1543年哥白尼的日心体系向它提出挑战。

公元前3世纪，在地心说占统治地位的年代里，亚历山大城的著名天文学家阿里斯塔克(Aristarchus, 315—230 BC)提出了日心说，这在当时是最具独创性的大胆假说。在他写的《太阳和月亮的大小与距离》一书中，他提出了太阳和恒星都是不动的，地球以太阳为中心作圆周运动，每年绕太阳公转一周，同时又绕其南北方向的轴周日旋转。他认为如果把太阳置于宇宙中心，月亮、地球及当时已知的五颗行星各自在大小不同的轨道上以不同的速率围绕太阳旋转，就可以得到一个简单的世界体系。

这个学说由于同人们的直觉经验不一致，而远远超过了那个时代的天文学和力学的知识水平，所以不能为当时的人们所

接受。由于它违背了柏拉图的哲学原则，被同代人视为大不虔敬。后来这个学说被指责为渎神的，长期受到教会的压制。

哥白尼（Copernicus, 1473—1543）是波兰的杰出的天文学家，他生活在文艺复兴时期，18 岁时他进入波兰著名的克拉科夫大学学习天文学，23 岁时他到意大利留学。意大利波伦亚大学教授诺瓦拉（Novara）认为托勒密体系过于复杂，不符合数的谐和原则的评论对哥白尼产生过影响，在此期间他还攻读了大量古希腊学者的著作，受到了有关地球运动的思想的启发，这为他创立新的宇宙体系奠定了思想基础。他终身研究的结晶是他的伟大著作《天体运行论》，据说，正好在他逝世之前，他在病床上看到这部巨著的印刷本，正是这本书向我们描绘了一个全新的宇宙。

哥白尼远不是一个想要推翻全部传统观念的革命派，他只想用尽可能少的匀速圆周运动组合起来构成一个宇宙体系，能够比托勒密体系统更好地体现出古希腊天文学家提出的原则。哥白尼最初的想法可见于题为《纲要》的一篇概论中，此文是在他写作《天体运行论》前几年写的。他在这篇文章中批评托勒密体系"似乎既不是充分完整的，也不是令人充分满意的"。因为托勒密引入的"偏心等距轮"违反了运动的均匀性这一基本原理，"而这样一来，行星就既不是在他的均轮上，也不是绕本轮的中心作匀速运动了。"

在《天体运行论》的序言里，他进一步指出，正是由于那些数学家们没有遵循统一的确定的原则，所以按照他们的理论无法推断宇宙的形状及其各部分永恒的对称性，使整个体系显得混乱不堪，很不协调。他写道：

"我对传统数学在研究各个天体运动中的可疑之处思索了很长时间之后，对于哲学家们不能对造物主为我们造成美好而有秩序的宇宙机械提出正确的理论而感到气愤，……"正是旧体系的这种矛盾，促使他阅读了希腊早期的哲学家和天文学家的著述，其中包括阿里斯塔克的有关日心说的论述。哥白尼申明

说，他正是从古人的著作里受到启发才开始考虑地球的运动，以便尝试一下，是否把太阳而不是地球置于中心，可以使天体运动的结构安排得更合理。他在序言中写道：

“我也开始考虑地球的可动性。……既然前人可以自由地组合他们喜欢的各种圆周来解释星辰现象，我想也可以允许我试试，看能否根据地球具有某种运动的主张，比前人更合理地解释天体的运行。在经过长期反复观测之后，我终于发现，如果把其他行星的运动同地球的运动联系起来考虑，并按每一行星的轨道比例来作计算，那么，不仅会得出各种观测现象，而一切星体轨道和天球之大小与顺序及天穹本身，就全部有机地联系在一起了，以致它们中的任一部分的改变，都不能不在其他部分乃至整个宇宙中造成混乱，因为这个缘故，……我采纳了这个体系。”由于上述原因，哥白尼采用了太阳在宇宙的中心而所有天体都围绕着太阳运转的模式。

在哥白尼的体系中，各天体相互联系，它们的运动具有简单而明显的规律性。哥白尼强调，日心体系提供了所有行星都必须以确定方式遵从的惟一图式，可以用行星的轨道周期来确定诸行星的排列次序。他以“天体的顺序”为题提出了他的宇宙结构模型：

“天球从远到近的顺序如下。最远的是恒星天球，包罗一切，本身是不动的。它是其他天体的位置和运动的参考背景。有人认为，它也有某种运动；但是，我们将从地球运动出发对这种视变化作另外的解释。在行星中土星的位置最远，30 年转一周；其次是木星，12 年转一周；然后是火星，两年转一周；第四是 1 年转一周的地球和同它在一起的月亮；金星居第五，9 个月转一周；第六为水星，80 天转一周。……太阳在它们的正中，一动也不动。”(图 2.5)

哥白尼体系提出了许多重要的物理学问题和富有启发性的思想。哥白尼清楚地理解到他的体系与托勒密体系之间的根本区别，在于描述所观察的运动时选取的参考系不同。

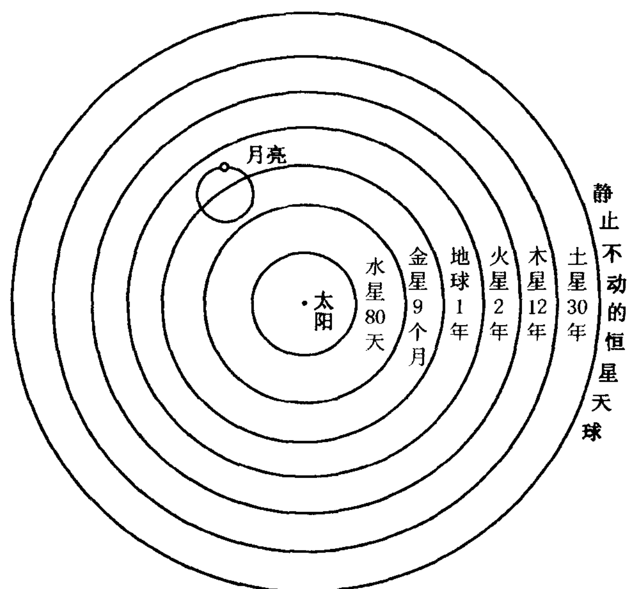


图2.5 哥白尼日心说模型

哥白尼体系的科学意义在于，它为理解行星的运动开辟了一条新的途径。这个体系不仅启发了开普勒等人按照全新的方式来考虑行星的真实轨道，来进一步详细地研究行星运动的"运动学"问题。而且，在《天体运行论》发表144年之后，还促使牛顿等人去研究行星运动的"动力学"问题。为引力理论的发展开辟了道路。

2.3.2 开普勒行星运动定律

由于受到所处时代的历史条件和科学发展水平的限制，哥白尼的日心说仍存在不可避免的缺陷，仍保留了柏拉图所提出的"匀速"和"圆周"的原则，企图用尽可能少的匀速圆周运动的组合描述行星运动。直到17世纪初，由开普勒建立了行星运动定律，至此完善和改进了哥白尼宇宙体系并使之建立在坚实理

论的基础上。



开普勒(1571—1630)

开普勒早年就读于哥廷根大学神学系，受到热心宣传哥白尼学说的天文学教授斯特林(M. Stlin)的影响，成为日心说的忠实维护者。1594年，他得到大学的有力推荐，中止了神学课程，去奥地利格拉茨的路德高级中学任数学教师并开始研究天文学，从事编制年历的工作。1596年他发表了第一部著作《宇宙的奥秘》，被当时丹麦著名天文学家第谷·布拉赫所赏识，1599年，第谷邀请开普勒到布拉格去作他的助手。1600年1月，开普勒接受第谷的邀请来到布拉格。在这里两位天文学上的巨人相会了。开普勒和他的老师有不同的特色和兴趣。第谷着重并善于实现观察，他精确地绘制了上千颗恒星的星图，测量和记录了20年来的行星位置；而开普勒则更醉心于数学和理论思考，他们互相依赖，互相补充。开普勒分析道："第谷拥有最佳的观察结果，并因而占有建立新建筑物的材料，他还拥有同行及工作人员和他所需要的一切。而他仅仅缺少一个能够根据某一独特计划来利用一切的建筑大师。因为，尽管他具备幸运的天资及真正建筑大师的技能，他也会由于以下这种事实(即现象的纷繁多样化和真理隐藏的这些现象的深处)而受到阻碍。"

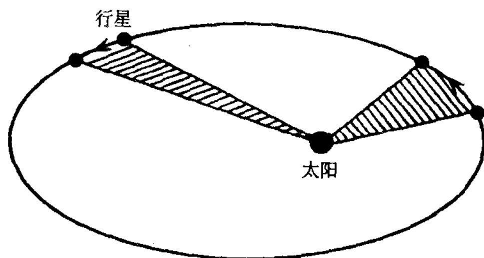
1600年初，开普勒在布拉格天文台承担的第一项重要任务是仔细地确定火星轨道的细节。在第谷给他分配任务时，他打算在8天时间内解决火星轨道这个问题，并且还打了赌。到发表结果时，历时不是8天，而是多年。

最初，开普勒估计，火星的轨道是圆形。他试着用已有模型来说明观察的结果。经过一年半之久，他拼凑组合了70次模型实验后，得到了一个接近观测事实的结果，但是他的模型所预测的位置，在黄道的径度上和第谷的观测记录有8′角度的误差。

他没有把它作为“观测的误差”忽略过去。因为他知道，第谷明察秋毫的慧眼和颇为精密的仪器记录的行星位置，其误差是远小于8′的。这8′之差意味着用已有模型组合，不可能得到与实测数据相符合的结果。于是他敏锐地觉察到火星可能不是作匀速圆周运动。束缚人们头脑两千年之久的柏拉图用“匀速圆周运动”的组合来解释天体运动的观念，第一次受到严肃的怀疑。不容忽略的这个8′，使他走上了改革整个天文学的道路。

经过多年工作，开普勒放弃了匀速圆周运动这个一向为人们所钟爱的古老信念，创立了椭圆轨道理论。“行星沿椭圆形路径运动，太阳位于这些椭圆的一个焦点上。”这就是开普勒第一定律。

这是一条经验定律，它告诉我们某行星的一切可能位置，但没有告诉我们该行星是什么时候处于这些位置上，这是很不够的。所以开普勒在第一定律以前就已经发现并建立了另一条支配行星速率变化的定律，即第二定律，用现代的话说就是“太阳指向行星的连线(径矢)在相等时间间隔内所扫过的面积相等。”



开普勒第二定律示意图

开普勒相信，研究各种可能性时或许会碰上一条联系整个太阳系的简单法则，他说“经过长期不断的艰苦工作后，利用第谷的观察结果，我发现了轨道的真正距离，最后终于找到了起初的关系，一下子消除了我心中的疑团，以致我起初还以为是在做梦……”这就是现在被称作的开普勒第三定律，即

$$T^2 = kR^3$$

其中 T 为各行星绕太阳公转周期, R 为椭圆轨道长半轴, k 为一常数。

开普勒关于天文学研究方法的特点,表现在:

(1) 对观察到的事实的一种较新的态度上,这就是科学的假设必须服从于准确而定量的观测证据。起初他根据哥白尼提出的行星间距离进行比较,提出一个由五种正多面体构成的模型作为解释行星轨道大小的主要工具,后来改为依据第谷的观测数据讨论行星的轨道,在先验的圆形轨道模型与观测数据不一致时,他就抛弃了这一模型,采用了与观测数据吻合的椭圆轨道模型。他在《哥白尼天文学概要》一书中指出,对假说的惟一限制是这些假说必须是合理的。他认为提出假说的主要目的是"说明现象,及其在日常生活中的用途"。如果一个假说明显违背观察到的事实,决不允许用一些方便的假设去掩盖这一矛盾。在这个意义上,开普勒的科学属于现代科学。

(2) 以几何和代数的语言即以数学公式来表达物理定律并获得成功。开普勒定律的表述是在科学史上物理定律应用于物体运动的头一个例子。它也是运动物体力学和数学紧密联系的头一个例子。自从开普勒的时代起,方程就作为物理定律的数学表示式自然地发展起来了。

(3) 他不仅从事运动学的研究,而且还从事天体动力学的研究。他有这样的正确看法,尽管太阳不在几何学的中心点上,但是依然是物理学意义上的中心。在开普勒看来,支配着行星的力在太阳上,这种力就像光一样从太阳发出。1605 年,开普勒在给一个朋友的信中写道:"我的目的在于证明:天上的机械不是一种神圣的、有生命的东西,而是一种像钟表那样的机械,正如一座钟的所有运动都是由一个简单的摆锤造成的那样,几乎所有的多重运动都是由一个最简单的、磁力的和物质的动力造成的。我也要证明,何以应当用数字和几何来表达这些物理原因。"这一设想虽然是错误的,但是开普勒把可观察的实验现

象作为出发点，从事实本身去寻求运动原因，这标志着近代物理学的主要特征之一的开端。

开普勒定律的发现，向人们提出了新的课题：是什么样的力维系着这些天体循着这样的轨道运动？许多科学家对此进行探索和讨论，其中英国物理学家胡克于1679年用三个假设来论述引力：

(1) 一切天体都具有倾向其中心的吸引力，它不仅吸引其本身各部分，并且还吸引其作用范围内的其他天体；

(2) 凡是正在作简单直线运动的任何天体，在没有受到其他作用力使其倾斜，并使其沿着椭圆、圆周或复杂的曲线轨道运动之前，它将继续保持直线运动不变；

(3) 受到吸引力作用的物体越靠近吸引中心，其吸引力越大，至于此力的数量级，在实验中还未解决。

1680年1月6日，胡克在给牛顿的另一封信中说："假设吸引力是与两中心间的距离平方成反比。"胡克、哈雷和伦恩等三个人在1679年都已推知平方反比定律，但他们都未能证明行星的椭圆轨道是平方反比定律的结果。

2.3.3 牛顿运动定律和万有引力定律的建立

17世纪自然科学家最突出的成就是经典力学体系的建立，它既是当时机械技术和天文学发展的必然要求，也是一大批科学家辛勤劳动的必然产物。伽利略关于地面物体运动的理论和开普勒关于天体运动的理论为经典力学体系的建立铺平了道路，而完成这一重任的是英国科学家牛顿，他把似乎截然不同的地面运动规律和天体运动规律概括在一个严密统一的理论中，这是物理科学也是人类认识自然的第一次理论大综合。

当牛顿在1661年进入剑桥大学时，那里还讲授一些经院式课程，如逻辑、古文、语法、古代史、神学，等等。牛顿在这时学习了亚里士多德的运动论。两年之后三一学院出现了新气象。H. 卢卡斯创设了一个别具一格的讲座，规定讲授自然科学知识

如地理、物理、天文和数学课程。第一任数学讲座教授巴洛(Isaac Barrow)是一位博学的科学家，他把牛顿引向自然科学，特别是数学和物理学的研究。

在 1664 年，牛顿已从亚里士多德的繁琐哲学思想下解放出来。在此以前，他读了笛卡儿的《几何学》和《哲学原理》，伽利略的《关于两大世界体系的对话》等著作。这些书有助于他思考的发展，走向新力学，对于后来牛顿力学的形成起了巨大的作用。他从伽利略那里继承了关于实验和数学的作用的看法，利用了他的落体定律和运动的合成。可是，对牛顿的力学思想的发展来说，笛卡儿的影响更为重要。他在立志使力学体系化的过程中，继承了笛卡儿的惯性定律、运动量守恒和圆周运动的解析这三大成果。如果看一看牛顿的早期手稿，那就不难发现笛卡儿对他的强烈影响。

牛顿在 1664—1665 年写的《未发表的记事手稿》(*Waste Book*)中，讨论了碰撞问题。他发展了笛卡儿关于运动量是物体质量与速度相乘的概念，不仅考虑到了运动量的大小，而且考虑到了它的方向。他对弹性碰撞的物理过程作了生动具体的描述，在碰撞中两球挤压，产生瞬时变形，而后恢复原形，球被弹射出去。他得出结论：两个质量相同的完全弹性球，以相同的速度相向作对心碰撞后，两者都以相同的速度向相反方向运动。碰撞问题的讨论，对于牛顿形成力的概念提供了一个理想的实验基础。在他的手稿中已经萌发了力的定义：力正比于它产生的运动量的改变。如果假设碰撞物体之间的作用力大小相等、方向相反，按照这个力的定义，必然得出碰撞过程中运动量守恒的结论。这说明在他的手稿中，力学的基本概念和基本定律已大体上显露出了全貌。

1665 年，英国发生了瘟疫，牛顿从剑桥大学回到故乡，在躲避瘟疫的 18 个月的时间里，他在力学、天文学、数学和光学方面进行了伟大的基础性研究工作。万有引力定律的基本研究思想和见解就是在这段时间形成的。

1684 年 5 月，牛顿终于用几何法和求线段比例极限的概念，证明了行星椭圆轨道运动的引力平方反比定律，8～10 月他写了《论运动》的短文，录了副本于 11 月交帕盖特带给哈雷，并于 1685 年 2 月收入皇家学会记录，这篇短文是发现引力平方反比的关键性文献。

在《论运动》这篇短文之后不久，牛顿又写了《论物体在均匀介质中的运动》的论文，定义了质量是物质的量，由体积和密度共同量度（没有质量的定义，万有引力定律是得不出来的）。因此，可以认为牛顿第二定律适应发现万有引力定律的需要，该论文可以看作是牛顿导向万有引力定律又一关键性文献。

牛顿的名著《原理》是《论运动》和《论物体在均匀介质中的运动》两篇论文的发展，是牛顿在哈雷的要求和鼓励下写成的。第一卷于 1685 年夏天完成，而公开于 1686 年 5 月；第三卷题为"论宇宙体系"，在这一卷里，牛顿用万有引力定律系统研究和计算了行星对太阳、月球对地球的作用及彗星运行轨道等问题，并发现计算结果与预计的误差在允许范围之内，这时，也只有在这时，万有引力定律才算正式建立起来了。

牛顿自己对万有引力问题只承认有两点成就：

(1) 肯定了地球的引力和天体之间的引力的同一性；

(2) 用数学方法表示出了万有引力定律。

然而牛顿引力理论没有立即获得普遍承认，特别是在法国。当时科学界广泛流传笛卡儿的涡旋以太理论。据说，许多学者之所以对牛顿的理论抱以敌对态度，部分是由于不懂得牛顿著作中所采用的数学方法所致。后经法国哲学家伏尔泰的推广和普及，才获得广泛的传播。

关于胡克与牛顿争论引力平方反比定律优先发现权一事，曾引起科学史研究者们的兴趣。胡克在 1680 年 1 月 6 日给牛顿的信中提到自己发现了引力平方反比关系，又在 1684 年向哈雷和伦恩说过，他能证明遵守引力平方反比关系的运动轨迹是椭圆。但他一直拿不出证据，后来也没有发现当时他证明的资

料。当胡克后来知道1686年牛顿在与哈雷的通信中提到发现万有引力定律时，宣布自己是引力平方反比定律的优先发现者，并在1693年皇家学会会议上又正式提出，因而展开了“万有引力定律发明权”的著名论战。胡克要求牛顿在《原理》序言中，对他的作用稍提一下，遭到牛顿的拒绝。牛顿说，“不想给胡克以任何荣誉。”两人在光学和万有引力定律发现问题上积怨过多，牛顿的态度固然可以理解，但胡克在发现引力平方反比定律过程中的作用，也理应给以实事求是的肯定。

万有引力定律发现之后113年，在地面上首次用实验证实定律的是卡文迪什，他于1798年进行的扭秤实验，测得两个小球之间的引力与计算相符。在天体相互作用方面，约翰·亚当斯于1846年计算出天王星运动轨道有不规则性，预言必是由其他行星的引力引起的，勒维烈据此算出这新星的方位，接着德国人加列通过观察，发现了海王星，位差不超过1°。于是，万有引力定律经过实践检验，取得了全世界的公认。

牛顿根据月球运行的周期等数据来证实万有引力定律假设，因数据误差过大未予公开，这是他搁置20年之久未发表万有引力定律的原因。其实，1675年12月，牛顿在给奥登贝格的信中，说出了自己的心情：“那只是一个假设，所以仅可看作是我的一个猜想罢了。”这里所指的猜想，就是平方反比定律，有了它，即可得出万有引力定律。究竟为什么牛顿把它看成是猜想而搁置呢？分析起来可能有三个原因。其一，牛顿推导是使用的圆轨道，而当时开普勒的椭圆轨道已证实是正确的了，对此，牛顿对猜想能否在椭圆轨道中应用，还未能有确定的答案；其二，对于圆轨道变为椭圆轨道后，原来位于中心的某物体则会出现偏心的位置，这时能否保证体系仍为稳定的系统是一个疑问；其三，当时的推导都是对天体而言的，在实际的物体之间的作用能否如猜想所推定？这些没有得出明确的解答，使牛顿不能公开。同时，为了深入讨论这一问题也促使牛顿在数学工具上开始全新的思索，而促使微积分的发明和发展。

2.4 牛顿力学的发展及其哲学思考

大家知道，有这样一个美好的传说：牛顿在果园中散步，偶然见到一个苹果落地，从而触发了他的灵感并导致万有引力的发现。无论这个故事的真实性如何，牛顿确实有过类似的思考，从抛体的下落联想到月球的不下落。图2.6中的抛体运动图是《原理》中的一幅插图，表示了抛体的轨道由近而远，然后过渡到圆形轨道、椭圆轨道。

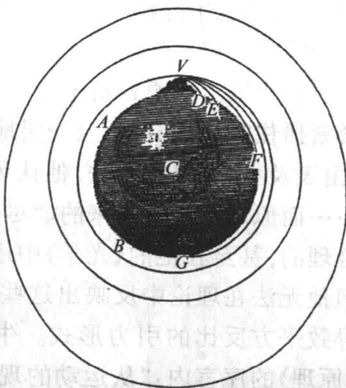


图2.6 牛顿的抛物体运动图

牛顿所总结出的三条运动定律，是机械运动最根本的规律，它们是经典力学的逻辑起点，由此可演绎出一系列的力学定理。第一定律是总纲，它涉及惯性和力这两个最基本的概念。整体上看，运动定律仍然是以“力”为中心；可以认为，惯性无非是从反面来说明力的效应。

牛顿对万有引力的物理机制，未加任何说明；而且，平方反比的定律形式，又显示了这种引力的超距作用特征，即星体之间某一时刻的距离决定了同一瞬间星体所受的引力，这意味着万有引力的传递既不需要时间、也不需要传递媒介。于是，万有引力定律就受到一些学者的批评及笛卡儿学派的非难。笛卡儿认为，星体的运动是涡旋-以太作用的结果。牛顿在这里明智地采用了务实的科学方法论，他将自己的理论谨慎地建立于对外在世界可靠观察的基础上，牛顿说：“到现在为止，我还不能从现象上发现引力性质的原因，而且我不创造假设；……对我们来说，引力真正存在，并按照我们已解释过的规律发生作用，而且足以说明天体和我们海洋的所有运动，这就够了。”

牛顿所谓的“不创造假设”，其实质是反对回避检验的空谈和无法证实的假说，这与唯理主义是针锋相对的。当然，科学理论并不能完全排除假说，爱因斯坦曾以牛顿的绝对空间概念为例，指出经验中并没有与之对应的东西，它就不是从经验中培植出来的“假说”。

从亚里士多德到笛卡儿，他们都急于回答“为何”，而牛顿则紧紧抓住“如何”，再一层一层地探索下去。牛顿所遵循的，正是“由表及里”的研究方法，他认为：“……真理由现象传达到我们……而原理是隐藏起来的。”尽管牛顿自己也不认为超距作用是合理的，甚至在他的《光学》中还提出了引力与以太联系的思考，但他无法在理论中反映出这些看法，因为星体的运动现象只能导致平方反比的引力形式。牛顿将他的研究模式明确地写在《原理》的序言内：“从运动的现象去考察自然界的力，再以这些力去验证其他现象”。一个没有任何机理说明的万有引力理论，终于战胜了物理图像具体的涡旋以太学说，这是令人深思的。牛顿敢于提出有超距色彩的万有引力，正表明了牛顿的超人胆识；对一般人，它是不可逾越的障碍，而对牛顿，则仅仅是带来一种遗憾，“让别人去发现它们的原因”。

拉普拉斯(P. S. M. Laplace, 1749—1827)在谈到牛顿的成就时，着重说明了时代如何造就这位伟大的天才：

> 大自然产生伟大的天才时，还须为他先预备好最适宜的环境。笛卡儿将代数学应用于曲线及变函数上，……惠更斯则发现运动的传递定律，伽利略对于落体，惠更斯对于渐曲线与离心力的研究导致曲线上运动的理论。开普勒已经确定行星所走的曲线，而且窥见了万有引力。最后胡克已经了解行星的运动是抛出它的原始力与太阳的引力组合而成的结果。因此天体力学这朵花的开放，只等待一个有才智的人来完成，他将把以上所说的这些发现联系起来，更加以普遍化，由此导出引力定律。这便是牛顿在其巨著《自然哲学的数学原理》内所作出的成就。

牛顿力学的发展，主要包括两大方面：一是研究对象的扩

展;二是探讨形式的更新。力学研究对象的发展,表现在两个方面:其一,它的研究对象由单个质点扩展到越来越复杂的力学系统,以至弹性波、气体分子运动;其二,力学定律的表达形式不断地更新,越来越抽象,其含义也越来越深远,使机械运动的特有规律与物质运动的其他规律逐渐接轨。

这主要体现在天体力学、流体力学、刚体力学和弹性力学的深入发展方面,在力学定律的形式更新方面,作为力学基本定律的是牛顿的第二运动定律,而《原理》中并未给出它的精确形式。我们今天所使用的公式

$$\boldsymbol{f}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\boldsymbol{v})$$

是欧拉于 1750 年给出的。

牛顿力学得以迅速发展,在很大程度上归功于欧洲大陆的一些优秀数学家。由于他们的努力,力学定律的表达形式一次又一次地推陈出新。在解析方法的基础上,矢量表达式发展为标量表达式,定律的常微分方程发展为偏微分方程,定律的微分形式演变为变分形式,从直角坐标系扩展到任意坐标系,从惯性参考系过渡到一般参考系。

在力学理论的演变中,以势函数来代替保守力,这是一个关键性的进展。力学定律表达形式的演变,原来是为了扩大应用的需要及使用上的方便,其结果却使力学基本规律显示出极为对称的形式。拉格朗日-哈密顿的分析力学不仅对经典力学是重要的,而且很容易推广到物理学的其他领域。下面再谈谈机械观的问题。

所谓机械观,即以机械运动的特点和规律来说明物质世界的所有其他运动,或者反过来说,将各种物质形态的运动都归结为机械运动。显然,机械观的物理基础就是牛顿力学。要理解机械观及其兴衰,不能不追溯到牛顿力学的建立、发展,以及它对物理学其他领域的影响、渗透;当然,最后还得涉及牛顿力学所遭遇的困难。

在牛顿力学创建之前，机械观就出现在西方各国，机械钟表的发明及广泛使用，助长了机械观的流行。可以说，笛卡儿是机械观的鼻祖，他甚至认为人体也是一种机械："给我广延和运动，我就能创造一个世界来。"这是笛卡儿的名言。霍布斯（T. Hobbes, 1558—1679），是机械哲学的鼓吹者，虽然他并不了解力学的数学方法，却认为伽利略的这种方法无处不可以应用。

牛顿在《原理》中即宣称："自然界的其他一切现象，全可以根据力学的原理，用相似的推理，一一演绎出来。"这不只是牛顿一个人特有的看法，而是代表了那个时代的共同信念。又如1690年惠更斯也说过："在真正的哲学里，所有的自然现象的原因都用力学的术语来陈述。"

牛顿力学的迅速发展及其对经典物理学的其他领域的成功渗透，有力地助长了机械观的发展。自《原理》问世以来，差不多一直到19世纪末，很少有物理学家对机械观持批判态度；相反，人们对到处开花结果的牛顿力学，无不顶礼膜拜。从康德、拉普拉斯，到因为电磁波实验而著名的赫兹（H. R. Hertz, 1857—1894），都是机械观的忠实信徒。

康德在《宇宙发展史中的概念》中写道："惟独力学的解释方式才颂扬了宇宙之美，同样也颂扬了神的启示的万能。"赫兹在《力学原理》中则认为："所有物理学家都同意：物理学的问题在于将自然现象追溯到力学的简单定律。"（见该书的作者前言）

赫兹不仅是一位杰出的实验物理学家，而且对麦克斯韦的电磁场理论有深入的研究；正是他，重新论证了麦克斯韦的学说，将电磁场的基本方程进行了合理的清理。赫兹持机械观，可以认为从侧面说明了，当时的电磁场理论的基础，仍然带有力学的色彩。显然，赫兹的观点是受到他的恩师亥姆霍兹（H. von Helmholtz, 1821—1894）影响的。亥姆霍兹是医学博士，但在物理学、生理学、数学以及哲学上都有重大成就，特别是，他为论证各种物质运动中的能量守恒，作出了卓越的贡献。尽管他熟知各种运动形态，却认为一切物质运动都应该归结为机械运动，一

切自然科学都可以归结为力学。

在20世纪之前，机械观至少流传了二百多年。因此，机械观的内涵不可能不有所变化，即使在同一时代，不同的学者也会有不同的看法。这里，我们只是依据20世纪以前物理学界流行的机械观，概括出几个主要特点：

物质的粒子性 持机械观的人往往都是原子论者。牛顿在《光学》里这样谈到原子："我以为上帝造就的一切东西，其颗粒大概都是有质量的实体，坚硬而不可穿透、但可以移动。……它们是磨不碎敲不破的。"牛顿的原子模型长期影响着人们的看法，即认为原子具有不可分性、不可入性、不可变性。

运动的决定性 经典物理学认为，任何物质粒子的运动都具有确定的轨道，可以同时决定粒子的位置和速度；如果已知粒子运动的初始条件和动力条件，就可以精确地预言粒子的今后运动。这种决定论，常称为机械决定论。

时空的绝对性 按照传统的时空观，时间和空间的测量彼此无关，也与观测者的运动状态无关；甚至认为，宇宙中存在着绝对静止的空间背景。物质的粒子性和时空的绝对性，导致经典物理学中出现了很多绝对的物理量。

作用的泛力性 在牛顿的倡导及影响下，除了万有引力、电力、磁力，还有什么聚合力、发酵力……几乎所有在物质之间的作用中都有广义的、延伸的"力"的概念。19世纪初，拉普拉斯就认为所有的物理现象都可以用粒子之间的吸引力和排斥力来说明。学者们对力的具体理解是很不统一的：笛卡儿反对力的超距作用，而牛顿则容忍了力的超距表述；安培派的联线力与毕奥派的横向力曾经互争高下；力从单纯的位置函数发展到还可以依赖粒子的运动；赫兹则走向另一极端，致力于建立一个没有力的力学。

机械观的上述特点，通常被看成机械观会导致外因论，以物质运动的变化为只有量变，而无质变；机械观的这种论点，实际上排除了机械运动具有内因，并且全然无视宏观世界中物质运

动形态有着“质”的多样性，从而将这些“质”的变化统统称为量变，这些都似乎是缺乏说服力的。

19 世纪，正当机械观鼎盛时期，奥地利的马赫(E. Mach, 1838—1916)却勇敢地站出来对牛顿力学进行了一系列的批判。马赫在物理学、空气动力学、生理学、心理学诸方面都有出色的研究成果，又是一位有独立见解的思想家。他首先指责牛顿对质量的定义(1868)，然后在他的《力学史评》(1883)中批评了牛顿的绝对时空及绝对运动概念，认为物体的惯性应由宇宙中所有的物质决定；此外，马赫从自己的经验论哲学思想出发，强调了可观察量的重要性。所有这些，都深深影响了 20 世纪近代物理学的进展，爱因斯坦曾称颂《力学史评》为“真正伟大的著作之一”。

马赫认为力的概念有拟人特点，可以以能量的概念来取代它；在这一点上，马赫对赫兹是有影响的。不同的是，马赫猛烈地抨击了机械观，他说：“把力学看作是物理学其他分支的基础是没有根据的，由力学来说明一切物理现象是一种偏见。”

对机械主义自然观的更严厉的批判，来自新的实验事实。

这在以后还有叙述。不过，我们应该认识到，机械观是物理学发展过程中的必然产物，它的提出决不是幼稚可笑的，它使物理理论彻底摆脱了神学的干扰，带动了整个经典物理学的成长；即使在现代，牛顿力学也没有丧失它的活力，在大量现代化的工程技术仍然正常地发挥着它的作用。科学是有继承性的，当我们谈论机械的偏激和片面性时，对那些为机械观奋斗过的前辈，还是怀着崇敬、感激的心情的。

在近代物理学里，物质的波粒二象性及由此产生的量子力学，对机械观的冲击是最彻底的；量子力学放弃了粒子运动的轨道概念，因而也就放弃了机械决定论。这使得对经典概念眷恋难舍的“老派”物理学家，不满意量子力学的流行解释(即哥本哈根学派的正统解释)，其中最著名的有爱因斯坦、L. V. 德布罗意等人。由于这些物理学家坚持在微观世界中保留传统的决定

论,他们的观点被称为新机械观。

新机械观也包括生物学里的机构观或还原论。持这种论点的人认为:生物学最终将还原为物理学和化学。其对立面"生机论"或"活力论",则怀疑物理学和化学是否具有这种能力。不管怎样,在当代的自然科学中,生物力学、生物物理等学科已破土而出,以新的生命力奋发崛起。

第三讲　作为科学基础的牛顿力学

力学是物理学科中最古老的学科，也是最基础的学科。它是研究物体运动的科学，从一般物体的运动到机械运动到天体运动。宇宙探测、航天、航空，都属于力学问题。对气泡室中的显示基本粒子的碰撞、衰变和相互作用的径迹分析也都属于力学问题。

力学中，有一部分是只描述运动的，这就是运动学的研究范畴。另一部分是将运动和运动相关的作用力以及运动物体性质联系起来的。这就是动力学研究的范畴。

3.1　质点运动学

在物质的多种多样的运动形式中，最简单而又最基本的运动是物体位置的变化，称为机械运动，行星绕太阳的转动，宇宙飞船的航行，机器的运转，水、空气等流体的流动等都是机械运动，它们都遵从一定的客观规律，力学的研究对象就是机械运动的客观规律及其应用。

描述机械运动，常用位移、速度、加速度等物理量，研究物体在位置变动时的轨道以及研究位移、速度、加速度等物理量随时间而变化的关系，但不涉及引起变化的原因，称为运动学。至于物体间的相互作用对物体运动的影响，则属于动力学的研究范围。本节研究质点的运动学。

参考系和坐标系

我们知道，要描写一个物体的运动，总得选择另一个运动物体或几个虽在运动而相互间相对静止的物体作为参考，然后研究这物体相对于这些参考物体是如何运动的。被选作参考的物

体称为参考系。

在运动学中,参考系的选择可以是任意的,主要看问题的性质和研究的方便。例如要研究物体在地面上的运动,最方便的是选择地球作为参考系。一个星际火箭刚发射时,主要研究它相对于地面的运动,所以就把地面选作参考系,但是当火箭进入绕太阳运行的轨道时,为研究方便起见,我们就要把太阳选作参考系。

同一物体的运动,由于我们所选参考系不同,对物体运动的描述就会不同,例如在匀速前进的车厢中的自由落体,相对于车厢,是作直线运动;相对于地面,却是抛物线运动;相对于太阳或其他天体,运动的描述更为复杂。这一事实,称为运动描述的相对性。实际上这个事实本身也正是表明对同一物体运动从不同运动状态的参考系的不同描述中去进行研究,才能更全面更深刻地认识物体运动的客观规律。总的说来,在自然界中,无论从机械运动来看,还是从其他运动形式来看,一切物质都处于永恒不息的运动之中,运动和物质是不可分割的。运动是物质存在的形式,物质的各种运动形式都有其特殊的规律,物质运动存在于人类意识之外,这便是所谓运动本身的绝对性,因此,在认识运动描述的相对性的同时,还必须认识运动本身的绝对性。

为了从数量上确定物体相对于参考系的位置,需要在参考系上选用一个固定的坐标系。一般在参考系上选定一点作为坐标系的原点,取通过原点并附标度的线作为坐标轴。常用的一种坐标系包括一个原点和三条相互垂直的坐标轴(x 轴、y 轴、z 轴),这种坐标系称为直角坐标系或正交坐标系。根据需要,我们也可选用其他的坐标系,例如极坐标系、球面坐标系或圆柱面坐标系等来研究物体的运动。

质点

任何物体都有一定的大小或形状。物体运动时,内部各点的位置变化可以各不相同。因此要确切描写物体的运动并不是一件简单的事。为使问题简化,我们可以采用抽象的方法:如果

物体的线度和形状在所研究的现象中不起作用，或所起的作用可以忽略不计，我们就可近似地把物体看作是一个没有大小和形状的理想物体，称为质点。

例如，研究地球绕太阳的公转，由于地球的直径较之公转运动的轨道直径要小得多，因此地球上的各点相对于太阳的运动基本上是可视为是相同的，也就是说，可以忽略地球的线度和形状，把地球当作一个质点。但是研究地球的自转时，如果仍然把地球看作一个质点，显然就没有实际意义了。由此可知，一个物体是否可抽象为一个质点，应根据问题的性质而定。

质点运动是研究物体运动的基础。当我们进一步研究物体的运动时，常把整个物体看作由无数个质点组成，分析这些质点的运动，就可能弄清楚整个物体的运动。

时间和时刻

任何物质运动都是在时间和空间中进行的，运动不能脱离空间，也不能脱离时间。时间本身具有单方向性的特点。“光阴一去不复返”这句话，正是说明了时间的单方向性。

运动学中，除时间外，还经常用到时刻的概念。在一定的参考系中考察质点的运动时，与质点所在某一位置相对应的为某一时刻，与质点所走某一段路程相对应的为某一段时间。例如，火车从北京开出的瞬间，表示某一时刻；火车从北京开到上海，需经历一段时间。又例如钟表上指针指的某一位置表示时刻，两个不同位置表示两个不同的时刻，而两个时刻的间隔就表示一段时间。

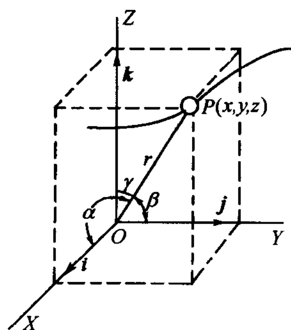


图 3.1　位置矢量

位置矢量

为了描述运动质点的确切位置，必须在选定的参考系上建立坐标系，如图 3.1 所示。质点

P 在直角坐标系中的位置可由该点的三个坐标 x, y, z 来确定，或者用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 来表示，将此有向线段记作 $\boldsymbol{r}$，称为位置矢量，也叫径矢。相应地，坐标 x, y, z 也就是径矢 $\boldsymbol{r}$ 的沿坐标轴的三个分量。

径矢 $\boldsymbol{r}$ 的大小

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

径矢的方向余弦是

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}$$

运动方程

质点的机械运动是质点的空间位置随时间而变化的过程。这时，质点的坐标 x, y, z 和径矢 $\boldsymbol{r}$ 都是时间 t 的函数。表示运动过程的函数式称为运动方程，可以写作

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \qquad (3.1)$$

或

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$$

当质点在选定在 x 轴和 y 轴组成的平面内运动时，则运动方程可简化为两个函数式：

$$x = x(t), \quad y = y(t)$$

另一函数式 $z = 0$ 通常不再写出，知道了运动方程，就能确定任一时刻质点的位置，从而确定质点的运动。力学的主要任务之一，正是根据各种力学问题的具体条件，求解质点的运动方程。

运动质点在空间所经过的具体路径称为轨道。质点的运动轨道为直线时，称为直线运动。质点的运动轨道为曲线时，称为曲线运动。轨道的数学表达可采用式(3.1)的参数方程，也可将式中参数 t 消去以后，得到轨道方程。

由上可知，运动方程表明 $\boldsymbol{r}$ 与 t 的函数关系，而轨道方程则只是位置坐标 x, y, z 之间的关系式，两者是不同的。例如，设已知某质点的运动方程为

$$x=3\sin\frac{\pi}{6}t,\quad y=3\cos\frac{\pi}{6}t,\quad z=0$$

从 x,y 两式中消去 t 后，得轨道方程

$$x^2+y^2=9,\quad z=0$$

以上两式表示质点在 $z=0$ 的平面内，作以原点为中心、半径为 3 的圆周运动。

位移

设曲线 AB 是质点轨道的一部分(图 3.2)。在时刻 t，质点在 A 点处，而在另一时刻 $t+\Delta t$，质点到达 B 点处。A、B 两点的位置分别用径矢 $\boldsymbol{r}_A$ 和 $\boldsymbol{r}_B$ 来表示。在时间 Δt 内，质点位置的变化可用 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示，称为质点的位移，位移 $\overrightarrow{AB}$ 除了表明 B 点与 A 点的距离外，还表明 B 点相对于 A 点的方位。

位移是矢量，是按三角形法则或平行四边形法则来合成的。譬如说，质点从 A 点移到 B 点，又从 B 点移到 C 点(图 3.3)，那么质点在 C 点处对 A 点的位移显然是 $\overrightarrow{AC}$。AC 是三角形 ABC 的一边，也是平行四边形 $ABCD$ 的对角线，位移相加可用矢量式表示：$\overrightarrow{AC}=\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{BC}$。

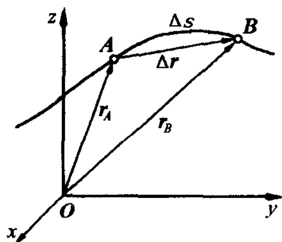


图 3.2　位移

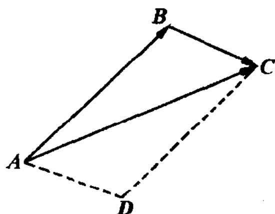


图 3.3　位移矢量的合成

从图 3.2 中可以看出，位移 $\overrightarrow{AB}$ 和径矢 $\boldsymbol{r}_A$、$\boldsymbol{r}_B$ 之间的关系为

$$\boldsymbol{r}_B=\boldsymbol{r}_A+\overrightarrow{AB}$$

或

$$\overrightarrow{AB} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A = \Delta \boldsymbol{r}$$

上式说明,位移$\overrightarrow{AC}$等于径矢 $\boldsymbol{r}_A$ 和 $\boldsymbol{r}_B$ 的矢量差,而矢量差 $\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A$ 也就是径矢 $\boldsymbol{r}$ 在 Δt 时间内的增量,所以用 $\Delta \boldsymbol{r}$ 来表示。

必须注意,位移表示物体位置的改变,并非质点所经历的路程。例如在图 3.2 中,位移是有向线段$\overrightarrow{AB}$,是矢量,它的量值 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 即割线 AB 的长度,而路程是标量,即曲线 AB 的长度,可记作 Δs。Δs 和 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 并不相等。显然,只有在时间 Δt 趋近于零时,Δs 和 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 方可视为相等。即使在直线运动中,位移和路程也是截然不同的两个概念。例如一质点沿直线从 A 点到 B 点又折回 A 点,显然路程等于 A、B 之间距离的两倍,而位移却为零。

位置矢量和位移在量值上都表示为长度,常用的单位为米(m)、千米(km)和厘米(cm)。

速度

研究质点的运动,不仅要知道质点的位移,亦要知道运动的快慢程度。若质点在 t 时刻位于 A 点,$t+\Delta t$ 时刻位于 B 点,则定义质点在这段时间内的平均速度:

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$$

这就是说,平均速度的方向与位移的方向相同,平均速度的大小与在相应时间 Δt 内单位时间的位移大小相同。

平均速度 $\boldsymbol{v}$ 只是粗略地描述质点在一段时间内运动的特点,然而在研究质点运动时,更重要的还要知道质点在某一时刻的运动状态,为此取时间趋近于零时平均速度的极限值,作为时刻 t 运动状态的描述,这个极限值称为时刻 t 的瞬时速度 $\boldsymbol{v}$(简称速度),即

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$$

加速度

在一般的运动中，质点的速度是随时间变化的，为了反映质点速度变化的快慢程度引入加速度的概念，仿照前面的讨论，可定义平均加速度：

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$$

定义瞬时加速度：

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$$

加速度是速度随时间的变化率，我们先讨论直线运动，若为匀速直线运动时，其运动方程为

$$x = x_0 + vt$$

其中，x_0 为 $t=0$ 时的位置，x 为 t 时刻的位置。

若为匀加速直线运动，则有

$$\begin{cases} x = x_0 + v_0 t + \dfrac{1}{2}at^2 \\ v^2 = v_0{}^2 + 2a(x - x_0) \end{cases}$$

式中 x_0 为 $t=0$ 时的位置，即初始位置；v_0 为 $t=0$ 时的速度，即初速度；a 为加速度。

若向上抛出一物体则初速度 v_0 不为零，而且方向是向上，而重力加速度方向则是向下，在计算此类问题时，应首先确定坐标的方向，若竖直向上为正方向，则 g 就为负值，再选取抛出物体处为坐标原点，则有

$$\begin{cases} y = v_0 t - \dfrac{1}{2}gt^2 \\ v = v_0 - gt \end{cases}$$

也可选取地面为坐标零点，则初始的 y_0 值就不为零了，相应的关系读者可以自己推算一下。

运动叠加原理

运动的叠加性也是运动的一个重要特性。先举例说明这一特性。如图 3.4 所示，A、B 为两个小球，在同一时刻，从同一高

度，使 A 球自由落下，B 球向水平方向射出。我们将看到，虽然 A、B 两球运动的轨道不同，一个是直线，另一个是抛物线，但是两球总是在同一时刻落到地上。这一实验事实说明，在同一时间内，A、B 两球在竖直方向上的运动距离总是相同的。B 球除了竖直方向的运动外，同时还有水平方向的运动，但水平方向的运动对于竖直方向的运动没有丝毫影响，反之亦然。由此可见，抛体的运动正是竖直方向和水平方向两种运动叠加的结果。

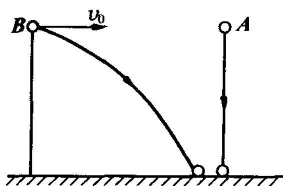


图 3.4 运动的叠加原理

根据类似的无数的客观事实，可得到这样一个结论：一个运动可以看成几个各自独立进行的运动叠加而成。这个结论称为运动的叠加原理。

抛体运动

现在应用运动的叠加原理，分析竖直平面内抛体的运动。

如图 3.5 所示，一物体自某点 O 以初速 v_0 抛出。取 O 为原点，水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴。设 v_0 与 x 轴所成的抛射角为 θ_0，那么物体的初速在水平和竖直方向的分量分别为

$$v_{0x}=v_0\cos\theta_0,\quad v_{0y}=v_0\sin\theta_0$$

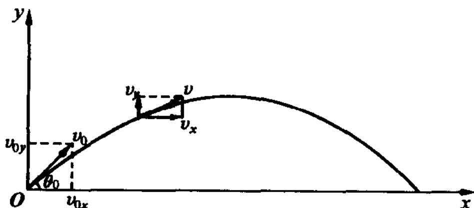


图 3.5 抛体运动

如果不考虑空气阻力和风速、风向等影响，那么物体在水平方向的运动是匀速直线运动，而在竖直方向的运动是匀加速度直线运动，重力加速度 g 的方向向下。因此，设抛出的时刻为

零,根据匀速和匀加速直线运动方程,可知物体在时刻 t 的速度分量分别为

$$v_x = v_0\cos\theta_0, \quad v_y = v_0\sin\theta_0 - gt \tag{3.2}$$

而坐标分别为

$$x = v_0\cos\theta_0 t, \quad y = v_0\sin\theta_0 t - \frac{1}{2}gt^2 \tag{3.3}$$

按照运动叠加原理,抛体运动便是由这两个方向的分运动叠加而成的。

从式(3.3)中消去 t 可得抛体的轨道方程:

$$y = \tan\theta_0 x - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta_0}x^2 \tag{3.4}$$

设抛体从地面上一点抛出,最后又落到地面上同一高度的另一点。因为终点和起点同高,因此令 $y=0$,即可求得飞行的总时间

$$t = \frac{2v_0\sin\theta_0}{g} \tag{3.5}$$

$t=0$ 表示物体在起点的时刻。如果要求出射程 R,即水平距离,只要将飞行总时间 t 代入式(3.3)内,就解得

$$R = \frac{v_0^2\sin2\theta_0}{g}$$

从上式不难看出,在一定初速下,要使射程为最大,应令抛射角 $\theta_0 = \frac{\pi}{4}$,这时最大射程为

$$R_M = \frac{v_0^2}{g}$$

如果要求出物体到达最高点所需的时间 t_H,应注意到物体在最高点时,速度的竖直分量为零。在式(3.2)中令 $v_y=0$,得

$$t_H = \frac{v_0\sin\theta_0}{g}$$

即飞行总时间的一半。将 t_H 代入式(3.3)内,可得最高点的高度

$$H = \frac{v_0^2\sin^2\theta_0}{2g}$$

从上式不难看出，在一定初速下，要使高度最大，应令 $\theta_0=\frac{\pi}{2}$，这时最大的高度为

$$H_M=\frac{v_0{}^2}{2g}$$

以上各式是弹道学的基本公式。在这基础上，如果考虑空气阻力、风速、风向等影响并加以校正，就能得到炮弹等抛体运动的正确轨道。

曲线运动中的切向加速度和法向加速度

质点在平面内运动的轨道是曲线时，通常采用运动的坐标系——自然坐标系加以分析。该坐标系虽然仍是平面直角坐标，但坐标的位置和取向随运动而改变。坐标原点选在运动的质点上，两坐标轴分别取为该点处曲线的切线方向（以 t 表示）和法线方向（以 n 表示），质点 t 时刻在曲线上的 A 点，速度为 v_A，$t+\Delta t$ 时刻在B 点速度为v_B，由于速度增量 Δv 与v 大小变化和方向变化都有关。现我们讨论其在两个特定方向即切向和法向上的变化，当 $\Delta t\to 0$ 时，则可求得质点 t 时刻在A 点的法向加速度a_n 和切向加速度 a_t，根据计算

$$a_n=\frac{v^2}{\rho},\quad a_t=\frac{dv}{dt}$$

v 为A 点的速率，ρ 为A 点处的曲率半径，a_n 是描述速度方向的变化率，a_t 是描述速度大小的变化率。质点作匀速圆周运动时，$\rho=R$，所以 $a_n=\frac{v^2}{R}$（为向心加速度），$a_t=0$。

圆周运动的角量描述

质点作圆周运动时，除了用前面讨论的位置矢量、位移、速度、加速度等物理量（统称线量）描述外，还可采用角位置、角位移、角速度和角加速度等物理量（统称角量）的方式来描述。

如图 3.6 所示，质点在作圆周运动，即质点在确定平面内绕圆心 O 的转动。质点在 t 时刻位于点A 的位置，它可由半径 OA 与过圆心O 的参考线Ox 的夹角θ 惟一地确定。角 θ 称为

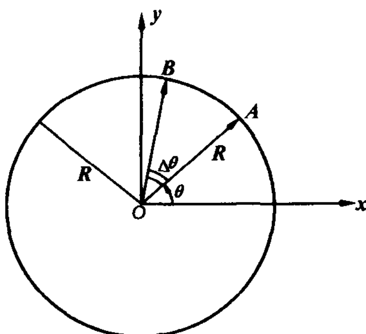


图 3.6　质点在平面上作圆周运动

角位置，它是时间 t 的函数，即 $\theta=\theta(t)$，称为质点作圆周运动时以角量描述的运动方程。

与前面讨论质点运动时引入的速度和加速度概念相似，同样可引入角速度来反映质点作圆周运动时转动的快慢，即角速度 $\omega=\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t$，以及引入角加速度来反映转动中角速度变化的快慢，即角加速度 $\beta=\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t=\mathrm{d}^2\theta/\mathrm{d}t^2$。

既然可采用角量和线量两种不同方法描述同样的圆周运动，这表明角量与线量之间必定存在着联系。如图 3.6 所示，在 Δt 时间内质点的角位移为 $\Delta\theta$，相应地，质点在圆轨道上所经历的路程 $\overset{\frown}{AB}=\Delta s$，由几何关系可知 $\Delta s=R\Delta\theta$，因此有

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{R\Delta\theta}{\Delta t}=R\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\theta}{\Delta t}=R\omega$$

$$a_{\mathrm{t}}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(R\omega)}{\mathrm{d}t}=R\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=R\beta$$

$$a_{\mathrm{n}}=v^2/R=v\omega=R\omega^2$$

质点作圆周运动的这种角量描述方法，在以后讨论物体作定轴转动中有着重要意义。

3.2　质点动力学

牛顿运动定律已在前面作过一些叙述，下面我们再把这三

条定律的意义，有关概念以及如何应用它来解题分别作些说明。

牛顿第一定律

第一定律指明任一物体不受到外力(即其他物体对它所作用的力)时，将保持静止或匀速直线运动的状态。物体保持这种运动状态的特性，称为惯性，所以第一定律又称为惯性定律。

同时，第一定律也确定了力的涵义。物体所受的力是外界对该物体所施加的一种作用，使物体的静止或匀速直线运动的状态改变，也就是使物体获得加速度。

我国战国时期的《墨经》中曾写道："力，形之所以奋也。"这里，"形"就是我们所说的"物体"，"奋"就是"由不动变为动"的意思。可见在两千年以前，我们的先辈已对力的意义有了明确的认识。在西欧，第一定律尚未建立以前，许多人误认为力是维持速度的原因，误认为物体不受力，就要失去速度而归于静止。伽利略在这类问题上，进行了实验，经过反复推敲，终于说明了力并不是维持速度的原因，而是改变速度的原因。

实际上牛顿第一定律是间接验证的，因为任一物体是不可能完全不受外力作用的。例如一个物体在粗糙水平面上滑动，因为物体受到摩擦阻力的作用，滑过一段路程后将完全停止下来。如果这物体以同样的初速度在一个较为光滑的水平面上滑动，由于受到的摩擦阻力要小一些，那么它将滑得远一些才停止下来，由此可以外推地设想，如果这物体在一理想的绝对光滑的水平面上滑动，那么由于物体不再受到使它减速的摩擦阻力的影响，物体也就保持其初速度不变而匀速运动下去。当物体受到两个或两个以上的外力作用时，如果外力的作用彼此抵消，亦即当物体处于力的平衡中，物体将与不受外力一样，保持静止或匀速直线运动状态；如果这些力的作用并不完全抵消，物体将在合力的作用下改变速度。在力学中常见的力有：万有引力、弹性力和摩擦力。

牛顿第二定律

在第一定律的基础上，第二定律对物体机械运动的规律，作



接触物体间的相互作用力

了定量的陈述，引入了“力”和“质量”这两个重要的物理量，并确定了力 f、质量 m 和加速度 a 之间的关系：

$$f = kma \tag{3.6}$$

式中比例系数 k 决定于力、质量和加速度的单位。采用国际单位制(SI 制)时 $k=1$，于是上式有

$$f = ma \tag{3.7}$$

式中质量的单位为千克(kg)，加速度的单位为米·秒$^{-2}$($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)，力的单位为牛[顿](N)。1N 就是作用于质量为 1 kg 的物体使其获得 $1\mathrm{m \cdot s^{-2}}$的加速度的力。

式(3.7)是牛顿第二定律的数学表达式，这是质点动力学的基本方程。如果知道物体所受的外力以及物体的初始条件(即 $t=0$ 时，物体的位置和速度)，那么受力物体在任何时刻的位置和速度就可以确定。所以这一方程也称为牛顿运动方程。

第二定律概括了下述基本内容：

首先，第二定律说明了任一物体在不同外力作用下，物体的加速度与外力之间的同时性和正比性关系。

其次，第二定律说明了任一物体在相等的外力作用下，物体加速度与物体质量之间的反比关系。这里，先要说明质量的意义。要知道，物体的惯性还表现受到外力作用时是否容易改变

速度这一事实上。譬如说，在相等的外力 f 作用下，某一物体的加速度 a_1 较大(因为容易改变速度)，另一物体的加速度 a_2 较小(因为不容易改变速度)，我们就说前一物体的惯性较小，后一物体的惯性较大。物体的质量就是物体惯性大小的量度。

其三，第二定律概括了力的独立性(或叠加性)。实验证明，如果几个力同时作用在一个物体上，那么所产生的加速度等于一个单力所产生的加速度，这个单力等于这几个力的矢量和。由此可以看出：几个力同时作用在一个物体上所产生的加速度，应等于每个力单独作用时所产生的加速度的叠加(矢量加法)，这称为力的独立性原理或力的叠加原理。运动叠加原理和力的叠加原理实质上是一致的。由于力的矢量性，我们可把式(3.7)写成

$$\sum \boldsymbol{f}_i = m\boldsymbol{a} \tag{3.8}$$

由此可见，式(3.6)和式(3.7)中的 $\boldsymbol{f}$ 应理解为物体所受的合力 $\sum f_i$。

应用第二定律时，应注意下述几点：

(1) 第二定律是说明瞬时关系的，$\boldsymbol{a}$ 表示瞬时加速度，$\boldsymbol{f}$ 表示瞬时力。力改变时，加速度也同时随着改变。力和加速度同时存在，同时改变，同时消失。加速度只在有力作用时产生，当力变为零时，加速度相应地变为零。

(2) 公式(3.7)是矢量式。实际应用时，常用正交坐标系中各轴线方向上的分量式

$$f_x = ma_x, \quad f_y = ma_y, \quad f_z = ma_z \tag{3.9}$$

或

$$f_x = m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}, \quad f_y = m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}, \quad f_z = m\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2}$$

应用上述分量式时，应注意各分量(力和加速度的分量)的正负决定于坐标轴的取向。

有时也常根据圆周轨道或曲线轨道的自然情况采用法向分量式和切向分量式来分析和求解力学问题：

$$\left.\begin{aligned} f_{n} &= ma_{n} = m\frac{v^{2}}{\rho} \\ f_{t} &= ma_{t} = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \end{aligned}\right\} \tag{3.10}$$

式中 f_n 和 f_t 分别代表法向合力和切向合力。

(3) f 是物体所受的一切外力的合力,但不能把 ma 误认为外力。例如:质量为 m 的物体,在水平桌面上运动(图 3.7)。物体在竖直方向所受的外力有重力 $\boldsymbol{P}$ 和桌面对物体的向上正压力 $\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{N}$ 相平衡,所以在竖直方向物体没有加速度。物体在水平方向上所受到的外力有水平拉力 $\boldsymbol{f}$ 和摩擦力 $\boldsymbol{f}_r$。水平方向的合力为 $\boldsymbol{f}+\boldsymbol{f}_r$,其大小为 $f-f_r$。按第二定律,得 $f-f_r=ma$,式中 a 就是 $f-f_r$ 所产生的加速度。ma 虽在量值上等于 f 与 f_r 两力之差,但不能认为是沿水平方向施予物体的第三个外力。

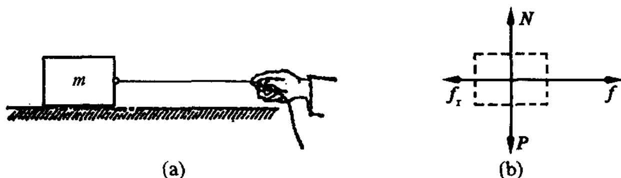


图 3.7

(4) 演算力学问题时,一般要作简图,画出物体所受的各个力。问题中如有几个物体相互接触,或用绳子连接,应将各个物体分开画出,然后画出每个物体所受的各个力。这种图称为隔离体图或示力图。应用示力图可以帮助我们把物体间的作用力与反作用力分辨清楚。选择恰当的坐标系之后,也可以比较方便地按牛顿第二定律列出各物体的运动方程,步骤也比较清楚。图 3.7(b)所画的就是(a)图中物体 m 的示力图。

牛顿第三定律

第三定律说明物体间的作用力具有相互作用的本质:力是成对地出现的,作用力和反作用力同时存在,同时消失;当作用

力和反作用力存在的时候，不论哪一时刻，一定在同一条直线上，而且大小相等，方向相反。必须特别注意，作用力和反作用力是分别作用在不同物体上的，一个物体所受的作用力决不能和这个力的反作用力互相抵消。B 物体受到 A 物体的作用力时，可获得加速度；同时 A 物体也受到 B 物体的反作用力，也可获得加速度。

还应该注意，作用力和反作用力一定属于同一性质的力，如果作用力是万有引力或弹性力或摩擦力，那么反作用力也相应地是万有引力或弹性力或摩擦力。

现在用一简单实例具体说明作用力与反作用力的关系。参看图 3.8，一重物悬在绳子的下端，绳子竖直，物体保持静止。这时重物受到两个力：一为绳的向上拉力 $\boldsymbol{T}$，一为地球作用于重物的向下引力 $\boldsymbol{P}$。因为物体处于平衡状态，可知 $\boldsymbol{T}+\boldsymbol{P}=0, \boldsymbol{T}=-\boldsymbol{P}$。$\boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 虽然是大小相等、方向相反的两个力，但必须注意不能错误地认为它们是一对作用力和反作用力。应该认识到 $\boldsymbol{T}$ 是绳子拉重物向上的力（作用在重物上），$\boldsymbol{T}$ 的反作用力是重物拉绳子向下的力 $\boldsymbol{T}'$（作用在绳子上）；$\boldsymbol{T}$ 和 $\boldsymbol{T}'$ 在同一竖直线上，大小相等、方向相反，且同是弹性力（张力）。$\boldsymbol{P}$ 为地球吸引物体的力（作用在重物上），方向向下，$\boldsymbol{P}$ 的反作用力为物体吸引地球的力 $\boldsymbol{P}'$（作用于地心），方向向上。$\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{P}'$ 大小相等，且同是万有引力。

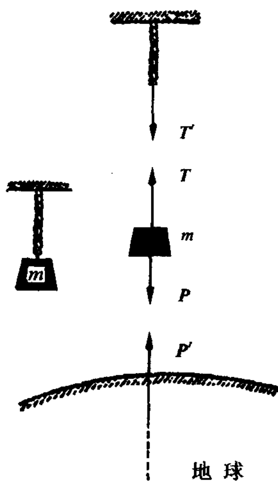


图 3.8

牛顿的三条运动定律之间有着紧密联系。第一定律和第二定律分别定性地和定量地说明了一物体的机械运动状态的变化与其他物体对这物体的作用力之间的关系。第三定律说明引起

物体机械运动状态变化的物体间的作用力具有相互作用的性质，并指出相互作用力之间的定量关系。第二定律侧重说明一个特定物体，第三定律侧重说明物体之间相互联系和相互制约的关系。

3.3 力的时间和空间累积效应

牛顿运动方程反映了某一瞬时物体所受的力与产生的效果——加速度之间的关系。但是，作为研究力的效果来说，还应注意到两方面的效应，一是力作用下的时间累积效应，一是力作用下的空间累积效应，即力在促使物体运行了一段路程中的累积效应。我们先研究力的时间累积效应。这里定义 $\boldsymbol{f}\mathrm{d}t$（或 $\boldsymbol{f}\Delta t$）为 $\boldsymbol{f}$ 在 $\mathrm{d}t$ 时间内的冲量，$m\boldsymbol{v}$ 为动量，从牛顿第二定律可得：

$$\boldsymbol{f} = m\boldsymbol{a} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(m\boldsymbol{v})}{\mathrm{d}t}$$

从而 $\boldsymbol{f}\mathrm{d}t = \mathrm{d}(m\boldsymbol{v})$

$$\int_t \boldsymbol{f}\mathrm{d}t = m\boldsymbol{v}_2 - m\boldsymbol{v}_1$$

它表示，在运动过程中，物体动量的增量即末动量与初动量的矢量差，等于在外力的持续作用下经过某一时间，外力对物体的冲量，这个结论叫动量原理。

由于力的作用是相互的，一物体受到其他物体的对它的作用力，同时它对其他物体也有反作用力，使其他物体的动量发生变化。由于作用力的冲量与反作用力的冲量等值反向，因此，一物体的动量增量等于其他物体的动量负增量。可以证明，如果几个物体组成一个系统，且系统不受外力的作用（或合外力为零），尽管系统内各物体在内力作用下，各物体的动量发生了变化，但是系统的总动量的改变为零，即总动量不变，即

$$\sum m_i \boldsymbol{v}_i = \text{恒量}$$

这就是动量守恒定律。在实际应用中，常用相应的分量式来表

示。根据分量式，我们又可进一步得出，如果物体（或系统）所受各个外力在某方向上的分量代数和为零，那么系统的总动量在该方向上的分量保持不变。

动量守恒定律在工程上有很多应用，如火箭和喷气飞机的飞行就是它的一个具体的应用。

在自然界中经常会遇到质点围绕着一定的中心转动的情况，为了描述这类活动，和我们在前面讨论曲线运动的想法类似，引入了角动量的概念，其定义是：质点在某时刻的角动量 $\boldsymbol{L}$ 等于它的径矢 $\boldsymbol{r}$ 和动量 $\boldsymbol{P}$ 的矢量积，即

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}$$

其单位是千克·米^2/秒（kg·m^2/s）。应当注意，同一质点相对于不同定点的角动量有不同的大小和方向，因此，在谈到角动量时必须指明是对哪个点而言的，否则没有意义。

前面，讨论了力的时间累积效应，从时空的另一个侧面有必要讨论力的空间累积效应。

功

“功”的概念是人们在长期的生产实践和科学研究中逐步形成的。功是描述力的空间累积作用的物理量。在力学中，“功”的定义很明确。恒力的功的定义是：力对物体所作的功等于力作用于位移方向的分量和作用点位移大小的乘积。譬如水平面上有一物体（图 3.9(a)），在水平恒力 f 的作用下沿力的方向运动，位移为 s，那么力 f 对物体所作的功 A 等于 f 的大小和位移 s 的大小的乘积，即

$$A = fs$$

如果 f 和 s 不在同一方向，两者之间的夹角为 α（图 3.9(b)），那么对于一个有一定形状和大小的物体来说，计算某力对物体的作的功，应注意到力的作用点的位移。即

$$A = fs\cos\alpha$$

从上式可知功有正负。当 $\alpha < \pi/2$ 时，功为正值，也就是力对物体作正功。当 $\alpha > \pi/2$ 时，功为负值，也就是力对物体作负

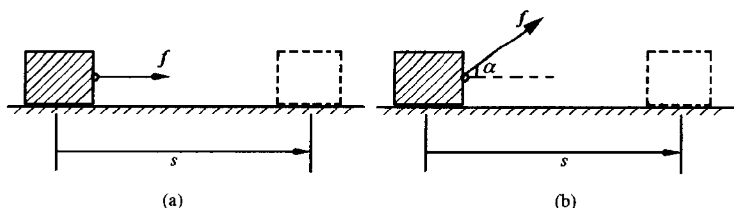


图 3.9　功的定义

功，或者说，物体反抗外力而作功。

功本身是标量，没有方向的意义。当力的作用点没有位移时也就没有作功；当力和位移相互垂直时，也没有作功。例如，物体作曲线运动，法向的力便不作功。

现在再来讨论变力作功的问题。为简单起见，先讨论力和位移同方向，力的大小随物体所在位置不同而改变的情况，设运动方向为 x 轴的正方向，力 f 是物体位置坐标 x 的函数，用 $f(x)$ 表示，我们来计算变力 f 在全部路程(从 x_1 到 x_2)中所作的功。

由于 f 是变力，所以我们要把全部路程分成许多微小的位移元，如图 3.10 所示的 Δx_i 等，在各段微小位移元内，力可视为不变。于是力在第 i 段位移元中所作的元功是

$$\Delta A_i = f(x_i)\Delta x_i$$

而力的全部路程中的总功是所有元功的累加，即

$$A = \sum f(x_i)\Delta x_i$$

如所取位移元为无限小，上式可改写为积分式

$$A = \int_{x_1}^{x_2} f(x)\mathrm{d}x$$

所以功的量值，在示功图里，准确地等于变力曲线(即 f-x 图线)与 x 轴在 x_1 与 x_2 之间的面积(图 3.10)。

变力 f 也可能在方向和量值上都在改变，因而物体作曲线运动(图 3.11)。在曲线运动中，我们必须知道在曲线路程上每一位移元 $\Delta \boldsymbol{s}_i$ 处，力 $\boldsymbol{f}_i$ 和位移元 $\Delta \boldsymbol{s}_i$ 之间的夹角 α_i，所以元功为

$$\Delta A = \boldsymbol{f}_i \cdot \Delta \boldsymbol{s}_i = f_i \cos\alpha_i \Delta s_i$$

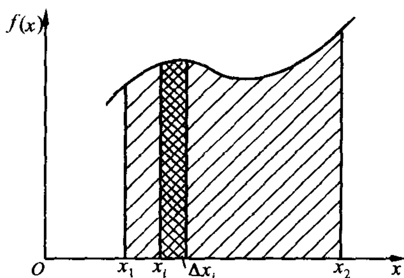


图 3.10 示功图

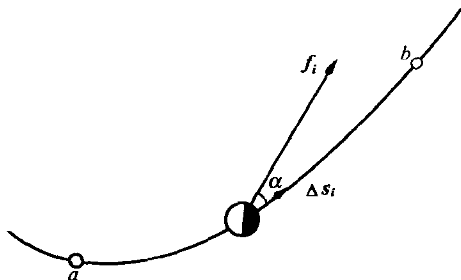


图 3.11 变力作功

将变力使物体从 a 点移动到 b 点过程中的总功用积分式表示，有

$$A_{ab} = \int_{r_a}^{r_b} f \cos \alpha \mathrm{d}s = \int_{r_a}^{r_b} \boldsymbol{f} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s}$$

式中 $\boldsymbol{r}_a$、$\boldsymbol{r}_b$ 表示运动物体的起点和终点的位置矢量。

假如有许多力同时作用于同一物体，我们不难证明合力的功等于各分力的功的代数和。

功的量纲是 $\mathrm{ML^2T^{-2}}$。在国际单位制中，功的单位是牛·米(N·m)，称为焦[耳](符号 J)；在工程制中，是千克力·米，没有专门名称。此外，在电工学中还常用千瓦小时(kW·h)作为功的单位，且有

$$1\mathrm{kW \cdot h} = 3.6 \times 10^6 \mathrm{J}$$

功率

在实际问题中，不仅要知道力所作的功，并且要知道完成这一功的快慢，因此要提出功率这一物理量，即单位时间内所作的功。设在时间 Δt 内完成功 ΔA，则在这段时间内的平均功率是

$$\overline{P} = \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

当 Δt 趋近于零时，平均功率的极限值称为某时刻的瞬时的功率，即

$$P = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}$$

或

$$P = \lim_{\Delta t \to 0} f\cos\alpha \frac{\Delta s}{\Delta t} = fv\cos\alpha = \boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{v}$$

上式说明瞬时功率等于力的速度方向的分量和速度大小的乘积。

功率的量纲是 $\mathrm{ML^2T^{-3}}$，在国际单位制中，功率的单位是焦·秒$^{-1}$($\mathrm{J \cdot s^{-1}}$)，称为瓦[特](W)。

3.4 动能定理　功能原理　机械能守恒定律

动能定理

外力作功对物体的运动状态又会引起什么样的变化呢？

为简单起见，先讨论物体在恒合外力作用下作匀加速直线运动的情况。设物体的质量为 m，初速为 v_0，所受恒合外力为 f，加速度为 a，经位移 s 后速度变为 v（参看图 3.12(a)），按匀加速直线运动方程可知 $v^2 = v_0{}^2 + 2as$，按牛顿第二运动定律有 $f = ma$，于是合外力对物体所作的功

$$A = fs = mas = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0{}^2 \qquad (3.11)$$

令

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0{}^2$$

式(3.11)可改写为

$$A = E_k - E_{k0} \tag{3.12}$$

式中所引入的物理量 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 称为物体的动能。式(3.12)说明合外力对物体所作的功等于物体动能的增量。这一结论称为动能定理。

再讨论合外力 f 是变力，物体做曲线运动的情况(图 3.12(b))。根据牛顿第二定律，$f\cos\alpha = ma_t$，而切向加速度 $a_t = \frac{dv}{dt}$，速度 $v = \frac{ds}{dt}$，则

$$f\cos\alpha\, ds = m\frac{dv}{dt}v\,dt = mv\,dv$$

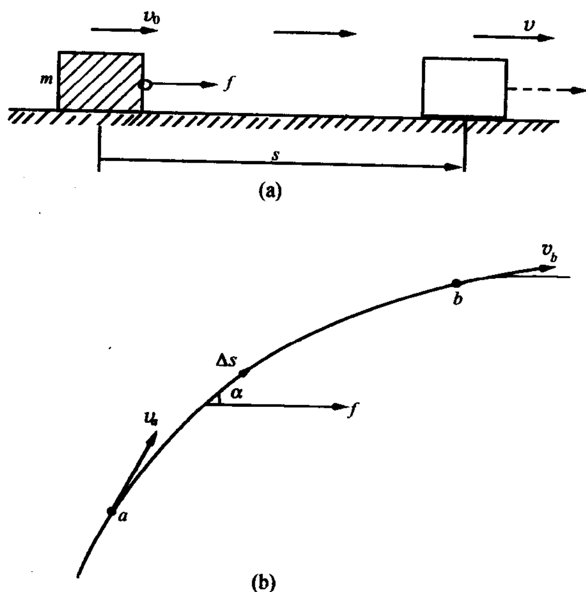


图 3.12　动能定理

于是

$$A = \int_a^b f\cos\alpha \mathrm{d}s = \int_{v_a}^{v_b} mv\mathrm{d}v = \frac{1}{2}m{v_b}^2 - \frac{1}{2}m{v_a}^2$$

因此，当外力对物体作正功(即 $A>0$)时，物体的动能增加；当外力对物体作负功(即 $A<0$)时，物体的动能减少，亦即物体反抗外力作功。因此，动能这一概念表示物体以一定速度运动时所具有的作功的本领，物体依靠动能的减少来作功。

利用动能作功的例子很多，锻压是利用锤的动能作功，水磨是利用水流的动能作功，帆船、风车是利用空气的动能作功，汽轮机是利用蒸汽的动能作功。

动能是表征物体运动状态的一个重要物理量，它是标量，大小等于$\frac{1}{2}mv^2$，单位与功相同。物体的动量 mv 也是一个表征物体运动状态的重要物理量。它们的意义有什么不同呢？首先，动量定理反映力的时间累积，动能定理反映力的空间累积。动量定理和动能定理都是适用于物体的一段运动过程的，而且动量和动能本身只联系于过程的始末状态。这样，从方法上说，动量定理和动能定理对于解决某些力学问题可能比直接应用牛顿第二定律要方便些，但要注意到，动量和动能分别联系于不同的物理量——冲量和功，两个定理不能相互混淆。第二，在动量方面，我们发现，仅在系统内部物体或质点间的相互作用下，不会改变系统的总动量。正是从这种客观事实中使我们认识到动量是表征物体机械运动的这样一种量度：在几个物体之间，如果通过力的相互作用而有机械运动的转移时，一定伴有等量的动量转移，一个物体得到多少动量的同时，一定有其他物体失去等量的动量。然而，我们如考察这系统的动能的问题(我们从下节起就要进一步讨论)，却并没有“必有等量动能转移”的问题，而是一种能量往往可以转化成其他形式的能量，包括机械运动有转化为其他形式(如热运动等)的能力，其他运动形式也有转化为机械运动的能力，其间，有一个等值交换“能量”的客观规律。可以这样说，动能是表示物体机械运动转化为一定量的可能是

其他运动形式的能力的一种量度。动能和动量这两种量度互不相同，各有其适用之处。

能的概念，是物理学和工程上最重要的概念之一，一个物体能够作功，我们就说这个物体具有能量。前已说明运动着的物体具有动能，现在我们来说明另一种形式的能量——势能。打桩时，铁锤从高处落下而作功，水力发电利用高处的水下落而作功。铁锤和水所以能够作功，是由于(1)它们与地球之间的相互作用——重力，(2)它们相对于地球的位置有所改变。物体因重力而具有的能量叫做重力势能。当拉长了弹簧逐渐恢复原长时，可以带动系在弹簧上的物体而作功，钟表中利用卷紧了的发条逐渐放松而作功。弹簧和发条所以能够作功，是由于(1)它们内部弹性力的作用，(2)它们所处的弹性形变状态的改变。物体因弹性力而具有的能量叫做弹性势能。总之，与相互作用的物体的相对位置有关的能量统称为势能。

按相互作用力的性质来区分，势能可有不同的形式。重力势能(与重力有关)和弹性势能(与弹性力有关)是力学中所讨论的势能。以后，我们还要遇到其他形式的势能，例如分子与分子之间的势能(由于分子间的相互作用)、电势能(由于静电力)等。

现在我们研究重力作功和弹性力作功的特点，定量地讨论重力势能和弹性势能。

重力作功的特点——保守力

物体和地球构成一重力系统。物体所受的重力是系统的内力。现设质量为 m 的物体从 a 点沿任一曲线 acb 运动到达 b 点，a 点和 b 点对所选取的参考平面来说，高度分别为 h_a 和 h_b，如图 3.13 所示。

在位移元 $\mathrm{d}s$ 中，重力 $\boldsymbol{P}$ 所作的功是

$$\mathrm{d}A = \boldsymbol{P}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{s} = mg\cos\alpha\,\mathrm{d}s = -mg\mathrm{d}h$$

式中 $\mathrm{d}h = \mathrm{d}s\cos(\pi-\alpha) = -\mathrm{d}s\cos\alpha$ 就是位移元 $\mathrm{d}s$ 中物体上升的高度，所以重力所作的功是

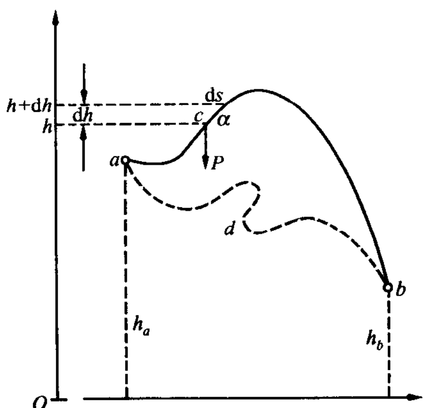


图 3.13　重力作功

$$A = \int \mathrm{d}A = \int_{h_a}^{h_b} - mg\mathrm{d}h = - mgh \Big|_{h_a}^{h_b}$$

$$= mgh_a - mgh_b \qquad (3.13)$$

可见物体上升时($h_b > h_a$),重力作负功($A<0$);物体下降时($h_b < h_a$),重力作正功($A>0$)。

从计算中可以看出,假使物体从 a 点沿另一曲线 adb 运动到 b 点,所作的功仍如上式所示。由此可知,重力有一特点,即重力所作的功只与运动物体的始末位置(h_a 和 h_b)有关,而与运动物体所经过的路径无关。

这个特点也可表述如下:当物体从图 3.13 中的 a 点沿任一闭合路径 $adbca$ 绕一周时,重力所作的功为零[可根据式(3.13)看出]。具有这种特点的力称为保守力,否则称为非保守力。

重力是保守力,此外如弹性力、万有引力(重力是万有引力的特例)、静电力等也都是保守力。摩擦力则不是保守力。例如,我们把放在地面上的物体,从一处拉到另一处时,地面对物体所作用的滑动摩擦力的方向恒与物体的运动方向相反,所作的功总是负功。如果经过的路程不同,摩擦力所作的负功也就

不同。如果物体运动所经过的路程为闭合路径，这个滑动摩擦力所作的功，决不等于零。所以摩擦力是非保守力。

重力势能

在式(3.13)中，如果令 $h_a = h$，$h_b = 0$，这时重力所作的功等于 mgh。因此，我们认识到，这一量值表示物体在高度 h 处（与物体在高度 $h = 0$ 处相比较）时，由于重力所具有的作功本领。所以通常把 mgh，即物体所受的重力和高度的乘积，称为物体与地球所组成的系统的重力势能，简称为物体的重力势能。

如果用 E_{pa} 和 E_{pb} 分别表示物体在高度 h_a 和 h_b 的重力势能 mgh_a 和 mgh_b，式(3.13)可改写为

$$A = mgh_a - mgh_b = E_{pa} - E_{pb}$$

或

$$A = -(E_{pb} - E_{pa}) \tag{3.14}$$

上式说明：重力的功等于重力势能的增量的负值，如果重力作正功（即 $A>0$），系统的重力势能能将减少（$E_{pb}<E_{pa}$）。反之，如果重力作负功（即 $A<0$），系统的重力势能将增加（$E_{pb}>E_{pa}$）。

应该注意：(1) 重力势能是属于物体与地球所组成的重力系统的。通常所谓“物体的重力势能”只是简称而已。因为物体与地球之间如果没有重力的作用，也就无所谓重力势能了。(2) 高度 h 并没有绝对意义，所以重力势能只有相对的意义。但是，如果我们选定在某一位置重力系统的势能为零，那么在其他位置时，重力系统的势能就有一定的量值。我们说物体在一定位置具有一定量值的势能，就是在这种意义上理解的。实际上，mgh 指的是势能差，式(3.13)指的也是势能差，我们所利用的势能也都是势能差，所以真正有意义的也是势能差。不管选定的零点势能怎样，势能差总有其绝对意义。(3) 重力势能的概念，是与重力是保守力这一特点密切相关的。由于重力所作的功具有与路径无关的确定的量值，才反映出重力势能具有确定的量值；反之，对于非保守力，因为非保守力的功并不确定，所以

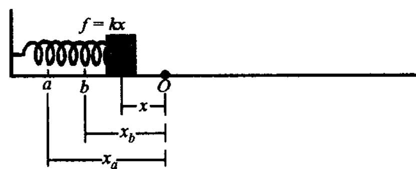
不存在与非保守力相关的势能。

弹性力的功　弹性势能

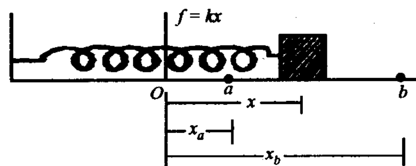
弹性力也具有保守力的特点。我们以弹簧的弹性力为例来说明。

将弹簧的一端固定，另一端连接一物体，并限制在光滑水平面内运动，如图 3.14 所示。O 点为弹簧未伸长时物体的位置，称为平衡位置。如果把弹簧向右拉长，弹簧将对物体作用一弹性力 f，方向向左。物体与弹簧组成一个系统，弹性力是系统的内力。

设 a、b 两点为弹簧伸长后物体的两个位置，x_a 和 x_b 分别表示物体在 a 和 b 两点距 O 点的距离，亦即弹簧的伸长量。现在计算当物体由 a 点到 b 点时，弹性力 f 将对物体所作的功。显然，当 $x_a > x_b$（弹簧缩短）时，弹性力作正功（图 3.14(a)）；当 $x_a < x_b$（弹簧伸长）时，弹性力将作负功（图 3.14(b)）。



(a) 弹簧缩短 ($x_a > x_b$) 时，弹性力 f 对物体作正功



(b) 弹簧伸长 ($x_a < x_b$) 时，弹性力 f 对物体作负功

图　3.14

根据胡克定律，在弹性限度内，弹簧的弹性力 f 的大小与弹簧的伸长量 x 成正比，即

$$f = kx$$

k 称为弹簧的劲度系数，亦即弹簧每伸长单位长度所需的力。因弹性力是一变力，所以计算弹性力作功时，须用积分法或图解法。

参看图 3.14(a)和图 3.15，可知当物体从 a 点到 b 点的路径中，弹性力 f 所作的功 A 等于图中 x_a 和 x_b 间的梯形面积，即

$$A = \frac{(kx_a + kx_b)}{2}(x_a - x_b) = \frac{1}{2}kx_a{}^2 - \frac{1}{2}kx_b{}^2 \quad (3.15)$$

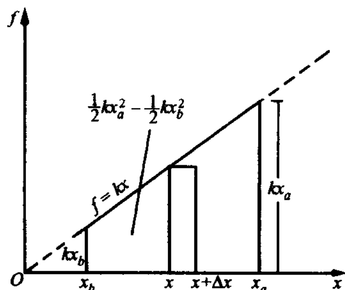


图 3.15 弹性力的功

读者可自己证明，式(3.15)也适用于图 3.14(b)所示弹性力 f 作负功的情况。

由此可见，弹性力的功和重力的功具有共同的特点，即所作的功也只与始末位置(x_a，x_b)有关。同样，如果物体由某一位置出发使弹簧经过任意的伸长和缩短(在弹性限度内)，再回到原处，则在整个过程中，弹性力所作的功为零。这说明弹性力也是保守力。

与重力系统的重力势能相似，对于物体与弹簧这一系统来说，弹性势能为$\frac{1}{2}kx^2$。这是弹簧伸长量为 x 时的弹性势能，弹簧无形变时的弹性势能规定为零。

如果用 E_{pa}和E_{pb}分别表示弹簧伸长量为 x_a 和 x_b 时的弹性势能$\frac{1}{2}kx_a{}^2$ 和$\frac{1}{2}kx_b{}^2$，式(3.15)可改写为

$$A=\frac{1}{2}kx_a{}^2-\frac{1}{2}kx_b{}^2=E_{pa}-E_{pb}$$

或

$$A=-(E_{pb}-E_{pa}) \tag{3.16}$$

和重力作功完全相似,上式说明:弹性力所作的功等于弹性势能的增量的负值。

功能原理　机械能守恒定律

前节中所讲的动能定理,也可以推广到由几个物体组成的系统。显然,系统的动能定理的形式,与式(3.12)相同,即

$$E_k-E_{k0}=A \tag{3.17}$$

这里,E_k 和 E_{k0}分别表示系统在终态和初态的总动能,A 表示作用在各物体上所有的力所作的功的总和。

对于几个物体组成的系统来说,A 包括一切外力的功和一切内力的功。内力之中,又应将保守内力和非保守内力加以区分。所以上式(3.17)改写为下式后就更清楚了:

$$E_k-E_{k0}=A_{外力}+A_{保守内力}+A_{非保守内力} \tag{3.18}$$

以前的式(3.12)是适用于一个物体(视为质点)的动能定理。这里,式(3.18)是适用于一个系统的动能定理。

保守内力(重力和弹性力)作功的同时,系统的势能(重力势能和弹性势能)将发生改变。保守力的功等于势能增量的负值(参看式(3.14)和式(3.15)),即

$$A_{保守内力}=-(E_p-E_{p0}) \tag{3.19}$$

至于非保守内力的功,可以是正功(例如系统内的爆炸冲力),也可以是负功(例如系统内的滑动摩擦力)。但是无论作正功或负功,都没有与之相关的势能的改变。将式(3.19)代入式(3.18)中,得

$$E_k-E_{k0}=A_{外力}+A_{非保守内力}-(E_p-E_{p0})$$

或

$$(E_k+E_p)-(E_{k0}+E_{p0})=A_{外力}+A_{非保守内力} \tag{3.20}$$

动能、重力势能、弹性势能统称为机械能。上式说明：系统机械能的增量等于外力的功和非保守内力的功的总和，通常称为系统的功能原理。

显然，在外力和非保守内力都不作功或所作的总功为零（或根本没有外力和非保守内力的作用）的情形下，由上式得

$$E_k + E_p = E_{k0} + E_{p0} = \text{恒量} \tag{3.21}$$

亦即系统的机械能长保持不变。这一结论称为机械能守恒定律。我们把它叙述如下：对于由若干个物体所组成的系统，如果系统内只有保守力（如重力、弹性力）作功，其他非保守内力和一切外力所作的总功为零，那么，系统内各物体的动能与各种势能（重力势能、弹性势能）之间虽然可以互相转换，但是它们的总和总是恒量。

机械能守恒定律一方面是由牛顿运动定律导出的结果，另一方面也是自然界最普遍规律之一的能量守恒定律的特殊情况。

如果系统内除重力和弹性力外，还有摩擦力或其他非保守内力作功，那么，系统的机械能将发生变化。事实证明：在系统的机械能减少或增加的同时，必须有等值的其他形式的能量增加或减少，而系统的机械能和其他形式的能量的总和仍然是恒量。这就是说，能量不能消失，也不能创造，只能从一种形式转换为另一种形式。这一结论称为能量转化和守恒定律，或简称能量守恒定律。对于一个与外界没有能量交换的系统（称为封闭系统），能量守恒定律可以这样叙述：在封闭系统内，不论发生何种变化过程，各种形式的能量可以互相转换，但能量的总和是恒量。

能量守恒定律是从无数事实中得出的结论，是物理学中具有最大普遍性的定律之一，可以适用于任何变化过程，不论是机械的、热的、电磁的、原子和原子核内的，以及化学的、生物的，等等。

能量守恒定律能使我们更深刻地理解功的意义。按能量守

恒定律,一个物体或系统的能量变化时,必须有另一个物体或系统的能量同时也发生变化。所以当我们用作功的方法(在下一讲我们会看到,也可以用传递热量等其他方法)使一个系统的能量变化时,在本质上是这个系统与另一个系统之间发生能量的交换。而这个能量的交换在量值上就用功来描述。所以,功是能量交换或变化的一种量度。

这里还应该指出,我们不能把功和能量看作是等同的。功总是与能量变化或交换的过程相联系着的,而能量代表着系统在一定状态时所具有的特性,能量的量值只决定于系统的状态,系统在一定状态时,就具有一定的能量。例如,对一个在重力场中运动的物体,当它在一定的运动状态时(在一定位置,具有一定的速度),它就具有一定量值的机械能。所以我们说,能量是系统状态的单值函数。

3.5 刚体的运动

在许多问题中,物体的大小和形状对运动有着重要的影响,以致不能再把物体视为质点。这时,就不得不考虑物体的大小和形状。如果在外力作用下,物体的大小和形状始终保持不变,这理想化的物体就称为刚体。

刚体可以看成是由无数个质点组成。由于刚体不会变形,刚体中任何两个质点间的距离都将保持不变,所以刚体也可以看成是一种特殊的质点组。因此,可以从质点及质点组的运动规律出发来讨论刚体的运动。

刚体的运动可分为平动与转动两种基本运动形式。当刚体中所有质点的运动轨迹都保持相同时,或者说刚体由于任意两点间的连线在运动过程中始终保持平行时,这种刚体的运动叫平动;当刚体中所有点都绕同一直线作圆周运动时,这种运动叫转动,这条直线叫转轴。转轴的位置和方向也可以随时间改变,当转轴固定不变时,刚体的运动称为定轴转动,下面讨论只限于

刚体定轴转动的情况。

刚体定轴转动的运动学描述

机器上各种齿轮、飞轮在工作时通常是绕固定轴转动的。当转轴相对某一惯性参考系(例如地面)不发生变化,这样的运动称为刚体的定轴转动。

我们将垂直于转轴的平面称为转动平面,在定轴转动的过程中,刚体上所有的质点都在各自的转动平面上绕轴作圆周运动。根据3.1节,质点在作圆周运动时,可用角量来描述。如图3.16所示,以 Ox 为参考方向,刚体上任一点 A 的位置可用它

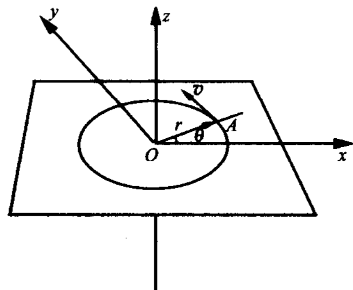


图3.16 转动平面和角量描述

的转动平面内的角位置 θ 惟一确定,由于刚体的形状、大小不变,转轴又是固定的,那么 A 的位置一旦确定,刚体上各点的位置也都确定,从而整个刚体的空间位置亦确定。可见,描述刚体的定轴转动位置,只要一个参量 θ。并且刚体上各点在同样时间间隔内应转过相同的角度,即刚体各点有相同的角位移、角速度和角加速度。所以,我们有理由把刚体上任一点的角位移、角速度和角加速度称为定轴转动刚体的角位移、角速度和角加速度,在3.1节中有关质点圆周运动的各种角量公式,对刚体定轴转动完全适用。

经验告诉我们,物体转动状态的变化不是简单地取决于作用力,而是取决于力矩。如图3.17,一个力对轴的力矩 M 等于

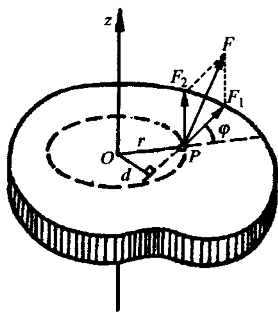


图 3.17　对轴的力矩

这个力在转动平面上的分力 F_1 和 F_1 与轴之间的垂直距离 d（称为力臂）的乘积，即

$$M = F_1 d$$

其矢量式为

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}_1 \tag{3.22}$$

若刚体不受外力矩作用（$M = 0$），刚体保持原有的转动状态不变（静止或匀速转动），这表明刚体有保持它原有转动状态不变的特性，即刚体的转动惯性。在定轴转动中，转动惯性大小可用物理量 J 来表示，称之为转动惯量，它不仅与刚体的质量有关，也与质量的分布和转轴的位置有关。

实验表明，定轴转动时刚体的角加速度 β 与刚体所受的合力矩 M 成正比，与刚体的转动惯量 J 成反比，即

$$M = J\beta, \quad 或 \quad M = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}, \quad 或 \quad M = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(J\omega)}{\mathrm{d}t} \tag{3.23}$$

这就是刚体定轴转动定律与质点运动时，牛顿第二定律的表达式 $F = ma$ 形式上的相似。M 与 F 对应，β 与 a 对应，转动惯量 J 与描述物体平动惯性的质量 m 对应。转动惯量 J 在式(3.23)中所处的位置又一次表明它是刚体绕轴转动惯性大小的量度。

如果把刚体视为特殊的质点组，并应用牛顿定律来讨论每个质点，从理论上也可推出上述结果，在此不作详细介绍。

转动定律是一瞬时表达式,当外力矩是变力矩时,直接应用转动定律来解决转动的动力学总是比较困难。此时可采用质点动力学中相类似的方法,讨论力矩的空间和时间的累积作用,从而得到相应的转动的功能定理和转动的角动量定理。

定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律

讨论一个绕定轴转动的刚体。因为刚体对轴的转动惯量 J 是常量,所以刚体定轴转动的转动定律可以变换为如下形式:

$$M = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(J\omega)}{\mathrm{d}t}$$

即刚体所受的外力矩,等于刚体的角动量对时间的变化率。式(3.23)还可写成

$$M\mathrm{d}t = \mathrm{d}(J\omega) = \mathrm{d}L$$

将上式积分,得刚体定轴转动的角动量定理:

$$\int_{t_0}^{t} M\mathrm{d}t = J\omega - J\omega_0 \tag{3.24}$$

式(3.24)中的积分式 $\int_{t_0}^{t} M\mathrm{d}t$ 表示作用在刚体上的合外力矩的时间积累,称为在时间 t_0 到 t 的冲量矩,$J\omega$ 与 $J\omega_0$ 分别表示时间 t 和 t_0 时的角动量,并记作 L 和 L_0。定轴转动的角动量定理表明作用于刚体上的冲量矩等于刚体角动量的增量。

导出式(3.24)时,只讨论了一个绕定轴转动的刚体。如果是若干个刚体组成的系统绕同一定轴转动,可以从理论上证明式(3.24)所表示的动量矩定理同样成立。不过,这时 L_0 和 L 应分别理解为转动系统在 t_0 时刻(即初状态)和 t 时刻的总角动量。这样,式(3.24)就是刚体系统的角动量定理,这个定理与质点组的动量定理很相似,它把一个过程的冲量矩(过程量)与该过程始末状态的动量矩(状态量)相联系。

如果式(3.24)中,转动系统所受的合外力矩等于零即 $M=0$,则在 t_0 到 t 这段时间所经历的过程中,转动系统总的角动量始终保持不变,即 $L = L_0$,这就是定轴转动的角动量守恒定律。

需要再次强调的是，在这里已经不是讨论一个刚体绕定轴转动的情况，而是一个绕固定轴转动的转动系统，因而，L_0 和 L 都是指的这个系统的总角动量。

在日常生活中，利用角动量守恒定律的例子是很多的。例如舞蹈演员、滑冰运动员等，在旋转的时候，往往先把两臂张开旋转，然后迅速把两臂收回靠拢身体，这样做会造成自己的转动惯量迅速减小，因而旋转速度加快。

无数实验证实，角动量守恒定律与动量守恒定律和能量守恒定律一样，也是自然界的一条普遍规律，在宇观的研究中，天文家应用角动量守恒来研究天体的演化。在微观领域内，原子、电子和原子核等的运动都有角动量。例如电子有绕原子核运动的角动量，还有自旋角动量等，分子、原子的特征状态常常以角动量作为标记。基本粒子的自旋角动量都有确定的数值，它同粒子的质量、电荷一样，表征着粒子的基本属性。

力矩作功与定轴转动中的动能定理

质点在外力作用下发生位移时，我们说力对质点作了功。当刚体在外力矩的作用下绕定轴转动而发生角位移时，我们就说力矩对刚体作了功。这是力矩的空间累积作用。

如图 3.18 所示，设刚体在切向力 F_t 作用下，绕转轴 OO' 转过的角位移为 $d\theta$。这时力 F_t 的作用点位移的大小为 $ds = rd\theta$。根据功的定义，力 F_t 在这段位移内所作的功为

$$dW = F_t ds = F_t r d\theta$$

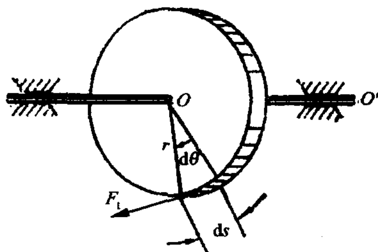


图 3.18　力矩作功

由于力 F_t 对转轴的力矩 $M=F_t r$,所以

$$dW = M d\theta$$

上式表明,力矩所作的元功 dW 等于力矩 M 与角位移 $d\theta$ 的乘积。

如果力矩的大小和方向都不变,则当刚体在此力矩作用下转过角 θ 时,力矩所作功为

$$W = \int_0^\theta dW = M\int_0^\theta d\theta = M\theta \qquad (3.25)$$

即恒力矩对绕定轴转动的刚体所作的功,等于力矩的大小与转过的角度 θ 的乘积。

如果作用在绕定轴转动的刚体上的力矩大小是变化的,那么,变力矩所作的功则为

$$W = \int M d\theta \qquad (3.26)$$

应当指出,式(3.25)和(3.26)中的 M 是作用在绕定轴转动刚体上诸外力的合力矩。故上述两式应理解为合外力矩对刚体所作的功。

同样与质点运动中功率的定义相似,我们用单位时间内力矩对刚体所作的功来表示力矩作功的快慢,并把它叫做力矩的功率。用 P 表示。

设刚体在恒力矩作用下绕定轴转动时,在时间 dt 内转过 $d\theta$ 角,则力矩的功率为

$$P = \frac{dW}{dt} = M\frac{d\theta}{dt} = M\omega \qquad (3.27)$$

即力矩的功率等于力矩与角速度的乘积。当功率一定时,转速越低,力矩越大;反之,转速越高,力矩越小。

设在合外力矩 M 的作用下,刚体绕定轴转过角位移为 $d\theta$,合力矩对刚体所作的元功为

$$dW = M d\theta$$

由转动定律 $M=J\beta=J\dfrac{d\omega}{dt}$,上式亦可写成

$$\mathrm{d}W = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}\theta = J\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}\theta = J\omega\mathrm{d}\omega$$

若 J 为常量，在 t 时间内，由合外力矩对刚体作功，使得刚体的角速率从 ω_0 变到 ω，那么，合外力刚体所作的功为

$$W = \int\mathrm{d}W = J\int_{\omega_0}^{\omega}\omega\mathrm{d}\omega$$

即

$$W = \frac{1}{2}J\omega^2 - \frac{1}{2}J\omega_0^2 \tag{3.28}$$

上式表明，合外力矩对绕定轴转动的刚体所作的功等于刚体转动动能的增量。这就是刚体绕定轴转动的动能定理。

为了便于理解刚体绕定轴转动的规律性，必须注意刚体定轴转动与质点运动在规律形式和研究方法上的类比。它们的一些重要的物理量和重要公式的类比见表 3.1。

表 3.1　质点运动与刚体定轴转动对照表

质点运动	刚体定轴转动
速度 $\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$	角速度 $\omega = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$
加速度 $\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$	角加速度 $\beta = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$
力 $\boldsymbol{F}$	力矩 M
质量 m	转动惯量 $J = \int r^2\mathrm{d}m$
动量 $\boldsymbol{P} = m\boldsymbol{v}$	角动量 $L = J\omega$
牛顿第二定律 $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ $\boldsymbol{F} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}}{\mathrm{d}t}$	转动定律 $M = J\beta$ $M = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}$
动量原理 $\int\boldsymbol{F}\mathrm{d}t = m\boldsymbol{v} - m\boldsymbol{v}_0$	角动量定理 $\int M\mathrm{d}t = J\omega - J\omega_0$
动量守恒定律 $\boldsymbol{F} = 0, m\boldsymbol{v} =$ 恒矢量	角动量守恒定律 $M = 0, J\omega =$ 恒量

续表

质点运动	刚体定轴转动
动能$\frac{1}{2}mv^2$	转动动能$\frac{1}{2}J\omega^2$
功 $W=\int \boldsymbol{F}\cdot d\boldsymbol{r}$	力矩的功 $W=\int M d\theta$
动能定理 $W=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$	转动动能定理 $W=\frac{1}{2}J\omega^2-\frac{1}{2}J\omega_0^2$

3.6 力学中的守恒定律与对称性

物理学中的守恒定律有其更深层次的内涵。所谓"守恒"即意味着"不变",守恒定律的不变性揭示了物质运动中诸多不同物理规律共同性和统一性的一面,然而这种不变性又由更高层次的对称性法则所制约。

对称性的概念最初来源于生活、艺术、结构领域的图像中。一个物体或任意一个整体各部分之间适当的比例、平衡、协调(所产生的美感)称之为对称。1951 年德国数学家魏尔提出了关于对称性的普遍的、严格的定义:如果一个操作使系统从一个状态变到另一个与之等价的状态,或者说状态在此操作下不变,我们就说系统对这一操作是"对称"的,而这个操作叫做系统的一个对称操作。物理学中的对称性是指物理系统或物理规律对应于变换的不变性。当一小球在匀速行驶的车厢里自由下落时,对不同惯性系中的观察者运动不同,在伽利略变换下,小球运动的轨迹不同,这就是具体事物的不对称性。但是,小球运动所服从的动力学规律(牛顿定律)是具有伽利略变换不变性的,这也就是物理规律的不变性。

变换可以是多种多样的。最常见的变换是时空变换,它包括有空间的变换(如使物体在空间平移一段距离的平移变换或使物体在空间绕某一轴线旋转一定角度的旋转变换等)、时间变换(如进行时间上的平移反演等变换)以及时空的联合变换(如

伽利略变换等)。

下面就力学中的三个守恒定律(动量守恒、角动量守恒、机械能守恒)分析它们与时空对称性的联系。

空间均匀性与动量守恒定律

经验告诉我们,在某处进行实验,然后平移到有相同环境的另一处做同样的实验,必然会得到完全相同的结果。例如一只运行的钟表无论把它带到哪里,通常快慢都是一样的,这表明当钟表所处的空间位置变换时,钟表内机械运动所遵循的物理规律是不变的。因此,可以表述为物理规律对于坐标平移变换即 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}'+\Delta\boldsymbol{r}$ 具有不变性,这就是空间均匀性的意义。

为了明确定义空间的均匀性,可以引入一个描述物体间相互作用能的函数(称势函数),例如太阳与地球之间的函数 U,它只与它们的相对位置有关而与参考点无关,假设地球的位置移动一个小量 $\Delta\boldsymbol{r}$。现以地球和太阳组成的系统的相互作用势能来分析,当地球移动一位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 时,系统的势能变化为克服太阳对地球作用力所作的功,即 $\Delta U=\boldsymbol{f}\cdot\Delta\boldsymbol{r}$;若地球不动,而太阳沿相反方向移动位移 $-\Delta\boldsymbol{r}$ 时,系统的势能变化为 $\Delta U'=\boldsymbol{f}'\cdot(-\Delta\boldsymbol{r}')$,式中 $\boldsymbol{f}'$ 是地球对太阳的作用力。值得注意的是:上述两种情况的终态之间的区别仅在于系统整体在空间有一平移,而地球与太阳的相对位置相同,空间的均匀性意味着系统的相互作用势能只与系统内物体的相对位置有关,与系统整体在空间的平移无关,因此有 $\Delta U=\Delta U'$,即 $\boldsymbol{f}=-\boldsymbol{f}'$。由 $\boldsymbol{f}=\mathrm{d}\boldsymbol{p}/\mathrm{d}t$ 可知,在相同时间内一物体动量的减少,必然等于另一物体的动量增加,因此对系统而言总动量保持不变,这就是动量守恒定律。

时间均匀性与能量守恒定律

时间均匀性是指时间的过去、现在和将来都没有什么特殊的地方,因此,今天如果我们重复前人做过的实验,应该得到与前人同样的结论,而且还可预言若干年后,有人做同样实验时也

会得到相同的结果，这就是时间均匀性的意义。

由于在一对粒子的系统中，粒子与粒子之间的相互作用可通过相互作用的势能来表达，在一维的情况下，两粒子之间的作用力 $F=-\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}$。时间的均匀性意味着这种相互作用势能只与两粒子的相对位置有关，与时间无关。因此，当一粒子相对另一粒子移动 Δx 距离时，力所作的功为

$$W=\int F(x)\mathrm{d}x=\int -\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}x=-\Delta U$$

而根据动能定理，该粒子所作的功应等于其动能的增量，即 $W=\Delta E_{\mathrm{k}}$。因此对系统来讲，总的机械能（势能和动能的总和）增量为零，即机械能守恒定律。

空间的各向同性与角动量守恒定律

空间的各方向上的物理性质都相同，称为空间各向同性。仍以一对粒子的系统为例。当一粒子沿以另一粒子为中心的圆弧移动 $\overset{\frown}{\Delta s}$ 时，它们之间相互作用的势能改变量是 $\Delta U=-f_{切}\overset{\frown}{\Delta s}$。空间各向同性意味着两粒子之间相互作用的势能只与它们之间的距离有关，与两粒子连线在空间的取向无关，上述转动不应改变它们系统的势能。因此，由 $\Delta U=0$ 可得相互作用力的切向分量 $f_{切}=0$，两粒子之间的相互作用力沿它们连线的方向，即 $\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{f}=0$，故相对于它们的质心而言，系统的角动量守恒。

在物理定律的对称性中，对于每一种对称性都有相对应的一条守恒定律。

3.7 振动与波动

简谐振动

振动是一种很普遍的运动形式，物体在某一位置附近作周期性的往复运动，叫做机械振动。例如，钟摆的来回摆动，活塞

的往复运动等，都是机械振动。但是振动并不限于机械振动，自然现象中存在着各式各样的振动，从广泛的意义上说，凡是描述物质运动状态的物理量在某一数值附近作周期性的变化，都叫做振动，例如，在交流电路中，电流和电压随时间作周期性变化，在交变场中，电场和磁场的强度随时间作周期性的变化等。这些振动和机械振动虽然在性质上并不相同，但是在对它们的描述上都有着许多共同之处，机械振动的基本规律是学习和研究其他形式振动以及波动、波动光学、无线电技术等的基础，在生产技术中也有着广泛的应用。

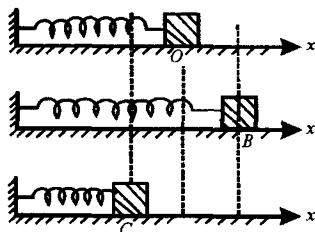


图 3.19　弹簧振子的振动

振动的形式很多，情况大多也较为复杂。简谐振动是最简单、最基本的振动。弹簧振子就是简谐振动的典型例子，如图 3.19 所示。

在弹簧振子中，物体在任意位置所受的弹性力 F 与弹簧的伸长量，即物体对于平衡位置的位移 x 成正比，而且弹性力的方向与位移的方向相反，总是指向平衡位置，当物体在点 O 的右方($x>0$)时，力 F 指向左方($F<0$)，反之亦然，即

$$F=-kx$$

式中比例常数 k 为弹簧的劲度系数，它由弹簧本身的性质所决定，负号表示力与位移的方向相反，根据牛顿第二运动定律可知，物体在弹性力的作用下所获得的加速度

$$a=\frac{F}{m}=-\frac{k}{m}x \tag{3.29}$$

对于一个给定的弹簧振子，k 与 m 都是常量，而且都是正值，所以它们的比值可用另一个常量 ω 的平方表示，即

$$\frac{k}{m}=\omega^2$$

把上式代入式(3.29)，有

$$a = -\omega^2 x$$

上式说明弹簧振子的加速度 a 与位移 x 成正比，而方向相反。把具有这种特征的振动，叫做简谐振动。可见，物体仅在弹性力的作用下的振动是简谐振动。

由于加速度 $a=\frac{d^2x}{dt^2}$，故上式可写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

或

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

上式即为简谐振动运动方程的微分形式，它的解是

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{3.30}$$

式中 A 和 φ 是积分常量，它们的物理意义将在后面讨论。由上式可知，当物体作简谐振动时，位移是时间的余弦函数，所以也可以说，具有这种运动方程形式的振动叫做简谐振动。

将简谐振动方程(3.30)对时间求一阶、二阶导数，可得简谐振动物体的速度和加速度：

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A\sin(\omega t + \varphi)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A\cos(\omega t + \varphi) \tag{3.31}$$

式(3.30)，(3.31)中的 x-t，v-t，a-t 关系如图 3.20 所示。从图上可以看出，简谐振动的位移和速度都是周期性变化的，它们每隔一定的时间重复一次前面的变化情况。

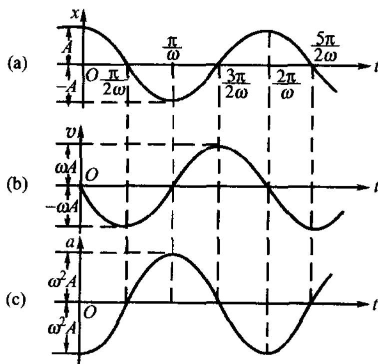


图 3.20 简谐振动图解($\varphi=0$)

振幅、周期、频率和相

位等都是描述简谐振动的物理量，现在结合简谐振动方程(3.30)来说明这些量的物理意义。

(1) 振幅。在简谐振动方程(3.30)中，位移 x 的绝对值最大为 A，我们把作简谐振动的物体离开平衡位置的最大位移 A，叫做振幅。

(2) 周期。运动的周期性是振动的基本性质。我们把物体作一次完全振动所需要的时间叫做振动的周期，用 T 表示，通常以秒为单位。例如在图 3.19 中，物体自位置 B 经 O 到达 C，然后再回到 B，经历了一次完全振动，这过程所需要的时间，就是一个周期。如以 T 表示周期，物体在任意时刻 t 的位置和速度，应与时间 $t+T$ 的位置与速度完全相同，所以有

$$x = A\cos(\omega t+\varphi) = A\cos[\omega(t+T)+\varphi]$$

而余弦函数是以 2π 为周期的，即：

$$\cos(\omega t+\varphi) = \cos(\omega t+\varphi+2\pi)$$

对比以上两式，有

$$\omega T = 2\pi$$

所以

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

对于弹簧振子，由式 $\frac{k}{m} = \omega^2$，有 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$，所以弹簧振子的周期为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

(3) 频率和角频率。单位时间内物体所做的完全振动的次数叫做频率，用 ν 表示，它的单位名称为赫[兹]，符号为 Hz。当物体每秒钟振动一次时，它的频率为 1 Hz。显然，频率等于周期的倒数，即

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

有

$$\omega = 2\pi\nu$$

所以 ω 表示物体在 2π 秒时间内的完全振动的次数，叫做角频率，单位是 s^{-1}，弹簧振子的频率为

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

由于弹簧振子的角频率 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 是由表征弹簧振子性质的物理量——质量 m 和劲度系数 k 所决定的，所以周期和频率只和振动系统本身的性质有关。这种由振动系统本身的性质所决定的周期和频率，叫作固有周期和固有频率。

(4) 相位和初相。由谐振动的位移和速度方程(3.30)和(3.31)可以看出，当振幅 A 与角频率 ω 一定时，振动的位移和速度都取决于物理量 $(\omega t + \varphi)$，此量 $(\omega t + \varphi)$ 叫做振动的相位。所以，当物体以一定的振幅和角频率作简谐振动时，相位不仅决定振动物体在任意时刻的位移，也决定振动物体在该时刻的速度。因此，相位是决定简谐振动物体运动状态的物理量。例如，图 3.19 中的弹簧振子作简谐振动时，当相位 $(\omega t + \varphi) = \frac{\pi}{2}$ 时，$x = 0$，$v = -\omega A$，即物体在平衡位置处，以速度 ωA 向左运动。当相位 $(\omega t + \varphi) = \frac{3\pi}{2}$ 时，$x = 0$，$v = \omega A$，物体也是在平衡位置，但以速度 ωA 向右运动，可见，不同的相位反映了不同的运动状态。

常量 φ 是当 $t = 0$ 时的相位，也叫做初相位，简称初相。

振幅 A 和初相 φ 都取决于起始时刻物体的运动状态。设当 $t = 0$ 时，振动物体有位移 x_0 和速度 v_0，把它们代入式(3.30)和(3.31)，则有

$$x_0 = a\cos\varphi$$

$$v_0 = -\omega A\sin\varphi$$

从上两式可得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{-v_0}{\omega x_0}$$

初位移 x_0 和初速度 v_0 叫做初始条件。上述结果说明，简谐振动的振幅和初相是由初始条件决定的。

机械波

现以沿绳子传播的波为例，分析机械波的形成过程。如图 3.21 所示，绳上的波是由手握绳端上下振动而引起的，这上下振动的绳端就是波源，而绳子是传播这种振动的介质。为什么绳端作机械振动时，会引起绳上各点的振动呢？因为绳上各质点之间是以弹性力相互联系着的，所以当绳的一端开始振动，在弹性力作用下，就会带动邻近的质点也振动，邻近的质点又去带动它的近邻的质点振动。这样依次带动，就把振动由近及远地传播出去，形成了波动。

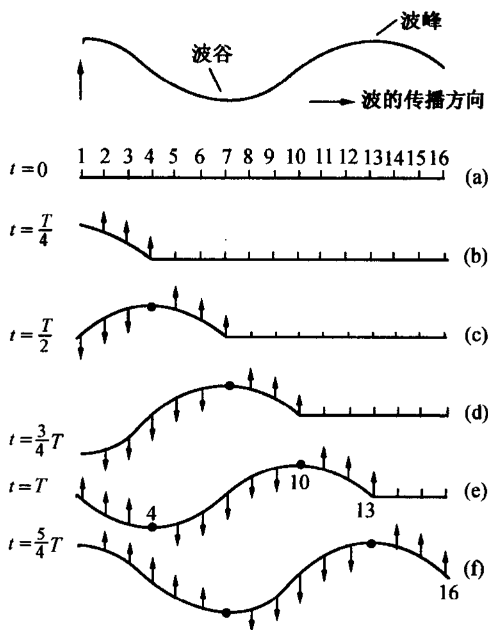


图 3.21　横波的形成

一般来说，弹性介质中任意一质点离开平衡位置时，由于形变，邻近的质点将对它产生弹性力的作用，使之回到平衡位置。因此，这个质点就会在平衡位置附近振动起来。同时，这个质点也会给邻近的质点以弹性力作用，使邻近的质点也在平衡位置附近振动。这样，当弹性介质的一部分产生振动时，振动不会只局限在这一部分，而会由于介质各部分之间的弹性联系，由近及远地在介质中传播出去，形成机械波。由此可见，机械波的产生必须有具有机械振动的物体作为波源及能够传播这种机械振动的介质。

在上述情况中，绳上各点都是在竖直方向上作上下振动，而波则是沿水平方向传播的。这种振动方向和波的传播方向互相垂直的波，叫做横波。还有一种波，例如在空气中传播的声波，其振动方向和波的传播方向相同，叫做纵波，横波和纵波是波的两种形式。

下面我们以横波为例，说明波的产生及传播情况。我们设想可把绳子分成许多小部分，并把每一个小部分看成是一个质点，如图 3.21 所示(图中只画出 16 个点)，点上的箭头指向表示它们的运动方向。开始时($t=0$)质点都在各自的平衡位置上，只是质点 1 在手的作用下，正要离开平衡位置向上运动。当质点 1 离开平衡位置时，由于质点间弹性力的作用，质点 1 就要带动质点 2 向上运动。同样，质点 2 又带动质点 3 向上运动。这样，每个质点的运动都将带动它右面的质点运动，于是，2，3，4，…各质点将依次先后振动起来，振动就沿绳子向右传播出去。

设波源的振动周期为 T，经过$\frac{1}{4}$周期，即当 $t=\frac{T}{4}$时，振动传到了质点 4 处，质点 4 正要离开平衡位置向上运动，如同质点 1 在 $t=0$ 时的运动状态一样，此时，质点 2、3 已经比质点 4 先离开平衡位置向上运动，而质点 1 已向上达到最大位移处，并将向下运动。再经过$\frac{1}{4}$周期，即当 $t=\frac{T}{2}$时，振动传到了质点 7 处，质点 7 正要离开平衡位置向上运动，而质点 1 已达到平衡位

置并将继续向下运动。在这段时间里，质点 2、3 不但先后达到最大位移，而且已经在返回平衡位置的过程中，质点 4 达到最大位移，正要向下运动，质点 5、6 已各自向上运动了一段距离。如此振动继续传播下去，就可以得到如图 3.21 所示的在不同时刻各质点的运动情况。

经过一个周期，当 $t=T$ 时，质点 1 完成了一次完全振动回到了平衡位置，又将向上运动，而质点 13 将开始向上运动。质点 13 的运动状态与质点 1 的相同，但在时间上落后了一个周期，此时 1 至 13 各质点间的连线是一个完整的波形，在以后的过程中，由于弹性力的作用，振动将继续向右传播，而且质点 1 每振动一次，即每经过一个周期，就向右传播一个具有波峰、波谷的完整的横波波形。

波源在弹性介质中振动时，振动将向各个方向传播。我们把波的传播方向叫做波线，把某一时刻波动所达到的各点连成的面，叫做波前或波阵面，波在传播时，介质中各质点都在平衡位置附近振动，我们把振动相位相同的各点连成的曲面，叫做波面。按波前的形状将波分成球面波和平面波等。在同一波线上，两个振动相位差为 2π 的质点之间的距离，即一个完整波的长度，叫做波长，用 λ 表示。

波的周期是波前进一个波长的距离所需要的时间，用 T 表示。周期的倒数叫波的频率，用 ν 表示，即 $\nu=\frac{1}{T}$，频率也就是单位时间内波前进距离中完整波的数目。

同时，还有 $v=\frac{\lambda}{T}$，$v=\lambda\nu$ 的关系。

波动的数学描述——波函数

当波源是作简谐振动时，介质中各点也作简谐振动，在介质中所形成的波叫做简谐波，下面讨论在均匀介质中，沿 Ox 轴正向传播的简谐波。如图 3.22 所示，设原点 O 处的质点在任一时刻 t 的位移为

$$y=A\cos\omega t$$

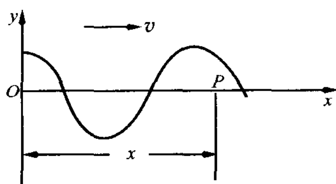


图 3.22 推导波动表达式用图

式中 A 是振幅，ω 是角频率。若在振动的传播过程中，各点的振幅不变，则当振动沿 Ox 轴方向传播到 Ox 轴上的任意点 P 时，点 P 处的质点将以相同的振幅和频率重复点 O 的振动。但是，因为振动从点 O 以波速 v 传播到点 P 时需要 x/v 的时间，也就是说，点 O 振动了 t 时间，点 P 只振动了 $(t-x/v)$ 的时间。点 P 在时刻 t 的位移等于点 O 在时刻 $(t-x/v)$ 的位移。因此点 P 在任意时刻 t 的位移为

$$y = A\cos\omega\left(t-\frac{x}{v}\right) \tag{3.32}$$

上式为沿 Ox 轴正方向传播的简谐波的表达式，称为波函数。对于沿 Ox 轴正方向传播的平面波，由于任意时刻在垂直于 Ox 轴的平面上各点的相位相同。因此，上式是平面简谐波的表达式，它含有 t 和 x 两个自变量，给出了在波动过程中任意时刻波线上任意点作简谐振动的位移。

因为 $\omega=\dfrac{2\pi}{T}=2\pi\nu$，$v=\lambda\nu=\lambda/T$，所以式(3.32)可以写成

$$y = a\cos 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)$$

或

$$y = A\cos 2\pi\left(\nu t-\frac{x}{\lambda}\right)$$

波的干涉　衍射　多普勒效应

从总结实验现象可知，介质中波动传播到的各点都可以看作是发射子波的波源，任意时刻这些子波的包络就是新的波前。这也就是所谓的惠更斯原理。应用这一原理，可以由某一时刻

波前的位置，用几何作图的方法，确定一下时刻波前的位置，从而确定波的传播方向。

波在传播过程中遇到障碍物时，其传播方向要发生改变，能够绕过障碍物的边缘继续前进，这种现象叫做波的衍射。

应用惠更斯原理，可以解释波的衍射现象。

当频率相同、振动方向相同、相位相同或相位差恒定的两列波相遇时，某些地方振动始终加强，而另一些地方振动始终减弱，这一现象叫做波的干涉现象。这两列能产生干涉现象的波叫做相干波，它们的波源叫做相干波源。表示两相干波从各自的波源到达点 P 时所经过的路程差，叫做波程差，在波程差等于零或为波长的整数倍的空间各点，合振动的振幅最大，在波程差等于半波长的奇数倍的空间各点，合振动的振幅最小。

在以上的讨论中，波源与观察者相对介质都是静止的，观察者所接受的波的频率与波源的频率相同。如果波源或观察者或两者同时相对于介质运动时，观察者所接受到波的频率和波源的频率就不相同，这种现象叫做多普勒效应。在日常生活中我们可以感觉到，高速行驶的火车鸣笛而去时，汽笛的声调变低，即波长变长，这种现象就是声波的多普勒效应。

波长向短波方向移动，这在光学上称之为“紫移”，反之则叫“红移”。

在天文学上，往往利用特征光谱线的“红移”与“紫移”来判断发射光谱的天体是远离我们而去，还是接近我们而来。天文学上的所谓“宇宙膨胀”的理论，其实验证据之一，就是观察到河外星系谱线红移。

3.8 牛顿力学的方法论及其哲学思考

牛顿定律及其力学体系的建立，是人类认识客观世界过程中的一次飞跃。美国科学史家库恩(Thomas S. Kuhn)把它称为科学革命。如果哥白尼日心说是第一次科学革命，牛顿力学

就是第二次科学革命。科学革命是技术革命的先导，在牛顿的科学革命之后大约一百年，出现了18世纪末19世纪初的工业革命或产业革命。牛顿在《原理》中提出了力学的三大定律和万有引力定律，把地面上物体的运动和太阳系内的行星的运动统一在相同的物理定律之中，从而完成了人类文明史上第一次自然科学的大综合，它不仅标志了16～17世纪科学革命的顶点，也是人类文明进步的划时代标志。它不仅总结和发展了牛顿之前物理学的几乎全部重要成果，而且也是后来所有科学著作和科学方法的楷模。牛顿的科学思想和科学方法对他以后三百年来自然科学的发展产生了极其深远的影响。

牛顿的科学观是因果决定论的科学观，他认为描述自然界的理论应该是决定论的。天体运动的原因就是万有引力，行星运动的规律是由万有引力定律决定的。他根据万有引力定律成功地解释了行星的卫星和彗星的运动，直至最微末的细节，同样也解释了潮汐和地球的进动。在牛顿力学中只要知道质点在初始时刻的位移和速度，根据牛顿定律就可以预言其后时刻的运动情况，这是典型的因果描写。

但是，在牛顿以前往往并不用因果论来解释自然现象，而用目的论来解释自然现象，即按照某种目的或结果来解释运动现象，而不是用力的原因作解释。牛顿采用因果性的解释在物理学的发展中是重要的一步。爱因斯坦指出："在牛顿以前还没有实际的科学成果来支持那种认为物理因果关系有完整链条的信念。"牛顿建立了物理因果性的完整体系，从而揭示了物理世界的深刻特征。

在决定论科学观的基础上，牛顿确立了他的物理框架，所谓物理框架就是对物理现象解释的一种标准。牛顿框架的核心是力和力所决定的因果性。认为找到了力的规律就是找到了对运动的解释。

然而，在牛顿以前并不使用力的框架，而是"和谐性"的框架。在哥白尼-开普勒时期，他们追求的是和谐性，即寻找运动

的和谐,认为找到了和谐就找到了解释,这种思想到哥白尼-开普勒时期发展到了顶峰,哥白尼之所以怀疑托勒密体系,主要是他认为托勒密体系很不和谐。正如哥白尼说则显示了"令人欣赏的对称性"和"清晰和谐性"。

到了牛顿这一代,不再采用和谐性框架,不再认为寻找"和谐"就是寻找对运动现象原因的解释,牛顿认为找到了力才是找到了对运动现象的解释。以后的物理学家主要依据力的框架进行工作。爱因斯坦指出:"直到19世纪末,它一直是理论物理学领域中每个工作者的纲领。""这个物理学框架在将近二百年中给予科学以稳定性和思想指导。"沿用牛顿的框架发展到顶峰的是麦克斯韦,麦克斯韦坚持牛顿的力的框架,他建立了电磁学的力学模型,企图用以太中的力来解释电磁现象,发展电磁理论,后来,他不再采用力学模型,而是用电磁场的概念来分析问题,这反映出框架的变化。

牛顿在科学研究中坚持以经验为基础,他认为在没有从观察和实验中发现力之原因时,决不杜撰假设。牛顿的"不杜撰假设"具有方法论的意义,这种方法与他同时代的大多数人所遵循的方法迥然不同。牛顿的同时代人都追随笛卡儿探索自然现象的原因,构筑引力的机制。而牛顿则不然,他所关心的不是引力"为什么"会起作用,而是"如何"在起作用。他的目的是寻求引力所遵从的规律,提出准确的数学描述,证明行星系统如何依赖于引力定律。

但是,牛顿的认识路线也不同于受经验主义影响很深的胡克的认识路线。胡克强调从实验上去探求引力定律,忽视数学推理的必要性。他的表述停留在定性认识上,缺乏定量的成分。他没有认识到当时更需要的是数学推理,而不是实验,因为所有行星运动的实验资料都已总结在开普勒定律之中,而胡克面对实验事实,迟迟不能提出物理模型,进行数学推导,从而确立力的定律。这是他的方法论上不如牛顿的地方。

牛顿所遵循的认识途径是从实验观察到的运动现象去探讨

力的规律，然后用这些规律去解释自然现象。正如他在《原理》一书的前言中写道："我奉献这一作品，作为哲学的数学原理，因为哲学的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究自然界中的力，然后从这些力去说明其他自然现象。"爱因斯坦对牛顿的科学认识道路给予了高度的评价。他在《自述》一文中写道："你(指牛顿)所发现的道路，是在你那个时代，一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的惟一的道路。"

牛顿的科学认识道路对以后物理学的发展产生了深刻的影响，许多物理学家都沿着牛顿的道路进行工作。1827年，安培在《电动力学理论》一书中，阐述了他处理电磁现象的方法：从观察事实出发，撇开力的性质的假说，推导出这些力的表达式，确立一般规律。最后他明确指出："这就是牛顿所走过的道路，也是对物理学作出重大贡献的法兰西知识界近来普遍遵循的途径。"

牛顿研究方法的一大特点是对错综复杂的自然现象敢于简化，善于简化，从而建立起理想的物理模型。宇宙间星体的相互影响是无限复杂的，每个星体都是一个引力中心，所以它是一个相互作用的多元的复杂系统；而且每个星体都有一定的形状和大小；每个"行星既不完全在椭圆上运动，也不在同一轨道旋转两次。"面对这一情况，不采用简化模型予以分别处理是极为困难的。1684年，牛顿在《论微粒》一书中指出："同时考虑所有这些运动之起因，是整个人类智力所不能胜任的。"牛顿是怎样对这一复杂系统进行简化的呢？他采用的简化模型的步骤是：从圆的运动到椭圆运动；从质点到球体；从单体问题到两体问题。他一次又一次地将他的理想模型和实际比较，再适当加以修正，最后使物理模型与物理世界基本符合。所以牛顿的万有引力定律既解释了为什么行星的运动近似地遵守开普勒定律，又说明了为什么它们又是那样或多或少偏离开普勒定律。

牛顿把一切物体间的引力归结为粒子间引力的思想，对以后的物理学影响很大，19世纪20年代，毕奥、萨伐尔和安培在

研究电流之间的作用时，总是把它们归结为电流元之间的作用力。

力学发展中充分显示科学思维对物理定律发现的重要性，其中值得再指出的是理想实验的研究方法，因为所谓理想实验是人们在实验中，摒弃一些次要的物理现象，从中紧扣主要的物理现象进行研究，曾有人形象化地讲："什么是物理，就是见'物'就问'理'。"所以，理想实验，是人们在实际实验的基础上，抓住事物的主要矛盾，忽略次要矛盾，对实际过程做出更进一步的抽象，从而在人们的思想上进行一种理论推理过程，这种推理过程和一般推理过程的区别是，它是按照实验的操作步骤进行的，只不过这个实验实际上是不能实现的而已，它是一种逻辑推理的思维过程和理性研究的重要方法。理想实验研究法，是物理学的一种重要研究方法。是由"物"及"理"的好方法。伽利略在研究使一个小球在平面上运动时，他发现减小摩擦，则小球运动距离就变长，同时小球的运动速度的减小变慢。他从这一实验事实出发进一步设想，如果把条件推到极限——引入一个绝对光滑平面的抽象概念，在此平面上，失去了导致小球速度变慢的原因——摩擦力，其结果只能是小球的速度不变。当然这个实验是不可能实现的，因为无法把平面做得绝对光滑，无法把摩擦全部消除，它只是一个理想的实验。伽利略的这个想法，后来由牛顿总结成运动第一定律——惯性定律。爱因斯坦高度评价伽利略这一贡献，他说："伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。"

牛顿运用形象思维的方法，进行创造性的思维活动，他也构思了一些神奇的理想实验，创造了新的物理图像，来揭示天体运动与地面上物体运动的统一性。

牛顿的科学思想和科学方法不仅使他少走弯路，发现了万有引力定律，而且深刻地影响着以后物理学家的思想、研究和实验的方向。这说明科学思维方法的极端重要性。从物理学的重

大发现中吸取科学思想、科学方法的营养，对提高我们提出问题、分析问题和解决问题的能力都是大有裨益的。

科学的推理方法，不仅是自然科学中的重要研究方法，即使对社会科学来说，它也是极为重要的。同时又应指出的是，在自然科学研究中，还存在对"悖论"的讨论，正如中国古代的"以子之矛，攻子之盾"的故事一样，运用这种科学的思考方法，对自然界中一些由于"先入为主"或"经验主导"等统治人们头脑的不能"自洽"的理论进行驳斥，使人看了心情舒畅，精神为之振奋。

牛顿力学是解决了不少问题，但是对于许多复杂的问题和力学科学体系还难以全部得心应手获得应用，也出现许多争论，这些争论也表明，它本身还有许多问题存在矛盾，有待解决，同时，也正因为如此，力学科学会有新的进步，整个科学事业会有新的发展。

第四讲 热学与能源工程

4.1 热学发展简史

热现象是史前人类就已认识的一种自然现象，人类从野蛮的原始社会进入文明社会，就是从火——热现象——的利用开始的，可以说火的利用是人类历史上的第一次技术革命。然而对热现象进行研究，却还只有四百多年的历史。



阿伏伽德罗
(1776—1856)
意大利物理学家

对热现象进行定量研究，首先遇到的是如何定量测定物体冷热程度的问题，即测量物体的温度。第一个测温器是伽利略在16世纪末制造的，当然十分粗糙，但它的基本原理却至今还在应用。一个玻璃球容器连有一根开口管子，管子的开口倒放进水里，玻璃球中的空气热胀冷缩，使管中的水面随之下降或上升，也就是以空气为测温物质，利用它的热胀冷缩性能来测量温度。但这样的测温器没有定量化，圣克多利斯于1611年在上述测温器的玻璃管上作了110个等分刻度，这是空气温度计的首次出现。

第一支用液体(水)作测温物质的温度计是法国人雷依在1632年创制的，约在1644年又改用酒精为测温物质，但水会结冰，酒精又容易沸腾，于是法国人阿蒙顿又采用水银作测温物质。当时"温标"的概念尚未形成，温度计虽有刻度，但分度法是任意的，缺乏明确的客观依据。不过当

时已有人提出要有两个固定点作为刻度的标准。如在佛罗伦萨实验科学院，以当地的夏季最高气温和冬季最低气温作为分度标，当然很不精确，刻度数也不统一，多则三四百格，少则几十格。

牛顿在测温学上也做过工作，他曾采用亚麻仁油作为测温物质，并规定雪的熔点为 0 度，人的体温为 12 度。后来荷兰的吹玻璃工匠华伦海特先后用酒精和水银为测温质，并把冰、水、氯化氨和盐混合物的温度定为 0 度，冰的熔点定为 32 度，人体的温度为 98 度，水的沸点为 212 度。法国科学家列奥米只取一个定点，即雪的熔点为 0 度，而把使酒精体积改变千分之一的温度变化为 1 度，这样，水的沸点就是 80 度。1742 年瑞典天文学家摄尔修斯引入了百分刻度法，用水银作测温物质，水的沸点为 0℃，冰的熔点为 100℃。后来他接受他人的建议，把这两个定点的标度值对调过来，一直沿用至今。在美、英等国，华氏温标也用得较多。

以上这些温标都与具体的测温物质有关，在精密测量中就不太好用了。后来又有热力学温标，即开氏温标，它不依赖于测温物质。1967 年第 13 届国际计量大会规定了水的三相点的热力学温度为 273.16 K。这样热力学温度的单位就是水的三相点热力学温度的 1/273.16，并重新定义了摄氏温度 t 与热力学温度 T 的关系为 $t = T - 273.15$。

温度计的发明，使量热技术得到发展，对于热现象的本质的探讨也就开始了。17 世纪，笛卡儿、玻意耳、胡克、牛顿、阿蒙顿、培根等都认为热是运动的一种形式。玻意耳曾做力学实验产生热，并以铁锤敲击钉子为例说明发热是由于运动被阻止的缘故。但总的来说，“热是运动”这一假说当时还没有强有力的证据。

到了 18 世纪，“热是运动”这样一种正确的观点却被抛弃了。人们普遍接受的是认为“热是一种物质”的热质说。当时的科学界倾向于对每种现象都想像出一种相应的物质。最早的是

17世纪斯塔尔提出的燃素说，认为可燃物中有燃素，无燃素之物则不可燃。到了18世纪又有了和光以太、电流质、磁流质等并列的热质。热质说在18世纪盛行还与当时条件有关，因为要对热现象作定量研究。用热质说似乎更为方便些、自然些。例如在无散热的情况下，将水和冰混合的过程中，水放热，温度降低，冰吸热，温度升高。对于这现象当时人们认为，水的热质减少，因此变冷，冰的热质增加，因此变热。所以冷的东西热质少，热的东西热质多。可以说直到现在，还有不少人自觉不自觉地持有这种观点——冷物体热量少，热物体热量多。

由于热质说对不少热现象都能作出令人满意的解释，例如可用热质说解释玻意耳定律和盖吕萨克定律等，而且在热质说的指导下发现了比热容、“潜热”，建立了热传导理论等(应该指出，这些概念和理论本身是正确的，并不因为热质说最终被抛弃而被否定)。所以，当时人们普遍相信热质说是正确的。如果人们认为某种理论是正确的，即使发现存在实验与理论相违背时，也往往容易去找一些理由来维护理论，而不是怀疑理论，这是人们思维上的一种“惰性”。相反，当一些有识之士采取科学的态度仔细分析这一切时，就有可能推进、发展理论——完善旧理论或推翻旧理论建立新理论。

在热质说盛行的时期，人们在想运用热质说来解释原始人钻木取火，用摩擦取热等现象时遇到了困难，无法作出完满的解释。但是热质说的拥护者仍认为，两块温度不高、热质不多的木头互相摩擦后温度升高了，但热质不变。这是因为摩擦把热质从木块中逼出来了，使摩擦后木块的比热比摩擦前的小。摩擦是否改变木块的比热容，而不改变它的热质，只有靠实验才能解答。其实，这样的实验，伦福德在将近200年前已经完成了；并得出否定的结果。

伦福德出生在美国，22岁时在独立战争期间逃到英国。他对军队生活有强烈爱好，对实验研究也有极大兴趣。1798年他在慕尼黑兵工厂领导钻制大炮的工作。他发现铜炮在钻了很短

时间后，就会产生大量的热，而被钻头从炮上钻出来的铜屑更热，比沸水还要热！这些热是哪里来的呢？它是由钻头在坚实的金属块中钻出来的金属屑所供给的吗？如果真是这样，那么根据热质说，它们的热容量不仅要变，而且要变得足够大，才能解释所产生的全部的“热”。伦福德写道：“但是这种变化不会发生。因为我发现，若把这种金属屑和用细齿锯从同一块金属上锯下来的金属薄片都取相同重量后，并把它们在相同的温度下各自放进盛有冷水的容器中去，冷水的量和温度也取得相同，放进金属屑的水看起来并不比放金属片的水热些或冷些。”他说：“实验中由摩擦所生的热的来源似乎是无穷无尽的。”“任何与外界隔绝的一个物体或一系列物体所能无限地连续供给的任何东西决不能是具体的物体”；所以，“除了只能把热认为是运动之外，我似乎很难构成把它看作为其他东西的任何明确的概念。”



伦福德(1753—1814)
出生于美国的英国科学家

1799 年，戴维做了实验，他用摩擦使放在露天的周围温度在冰点之下的冰融化了。此时人们开始怀疑热质说，而热质说的真正被抛弃是由于 19 世纪 40～50 年代能量守恒和转换定律的建立。

能量守恒的初步思想，在近代自然科学发展的初期就有了。伽利略通过斜面和摆的研究曾意识到，物体下落过程中所获得的速度，能使它重新回到原来的高度，但不会更高。惠更斯通过完全弹性碰撞的研究，认识到碰撞前后 mv^2 不变(实际上是动能守恒定律)。当然这些都只是初步设想。

17～18 世纪很多人搞永动机(图 4.1)。达·芬奇早就看出这些企图总要失败。1775 年法国科学院终于对任何永动机计划关上了大门。很多机械师们在设计永动机上面浪费了他们的年华,埋没了他们的天才,甚至断送了他们的前途。形形色色永动机的失败,显示了自然力和物质运动不可能无中生有地创造出来,它只能从一种形式转变为另一种形式,人们只能按照这条自然规律来利用、掌握自然力,来改造自然。可惜在 19 世纪 30 年代前,人们还没有从不可能造出永动机的结论中直接引申出能量守恒定律。

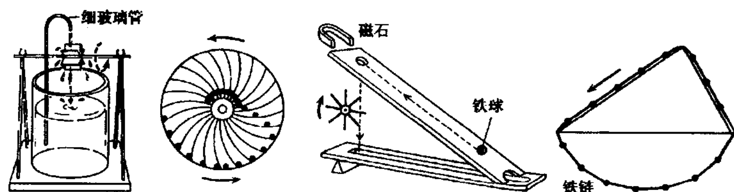
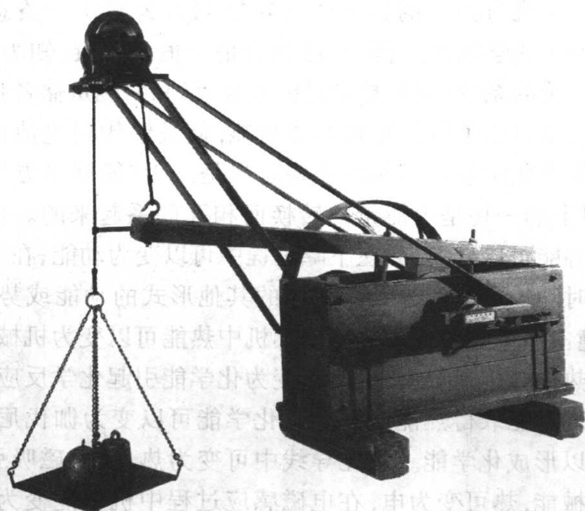


图 4.1　形形色色的永动机

能量守恒定律的建立,是很多科学家努力的成果。当时已有各种运动形式,如机械、热、电、磁以及化学、生物等,而且可以互相转化。例如,在 18 世纪初,英国的纽卡门制作的大规模把热变成机械运动的蒸汽机在英国煤矿使用。18 世纪后半叶,瓦特对它做了重大改进,促进了产业革命。伦福德的实验实际上是将机械运动转化为热运动,这些都为能量守恒定律的建立作了准备。定律的最后确立,主要是迈耶、焦耳和亥姆霍兹完成的。

迈耶是一位德国医生。在印尼爪哇,他发现生病的船员的静脉血是鲜红的,这通常只在动脉中才有,因为动脉中有较多的氧,于是在 1840 年他得出结论,在热带气候,身体只需少量的氧就能维持体温,所以让静脉中留下较多的氧。由此迈耶认为,食物所含的化学能可以转变为热。他又听海员说,暴风雨时海水比较热,联想到热与机械运动有相关性。1841 年他将自己的第



迈耶设计的热功当量测量装置

一篇论文《论力的量和质的测定》,寄到当时德国权威性物理刊物《物理学与化学杂志》,主编怕引起争辩,不予发表,也没有给作者写回信(直到 1881 年,论文才被用真迹复制的方法发表出来)。迈耶对此很失望,他接受朋友们的劝告,决心用实验来证实他的思想。他利用实验证明了水由于振动可以变热,但由于没有测定振动所消耗的功的仪器,无法精确测定热功当量。他利用气体在恒定容积下的比热容 c_V 和恒定压强下的比热容 c_p,计算出热功当量。1842 年他的论文《论无生命自然之力》寄到《化学与药学杂志》,主编李普西是德国著名的生物化学家,他一向对各种自然力之间的相互关系十分注意,所以发表了迈耶的文章。这样迈耶就成了第一个发表能量守恒与转换定律的人。在这篇论文中,他说:"力一旦存在,不会消失,只能改变其形式。"他所说的"力",实际就是能量,因为当时还没有能量这个词(直至 1853 年,汤姆孙才提出能量概念的确切定义)。1845 年迈耶出版了一本单独的小册子《与新陈代谢有关的机体运动》,

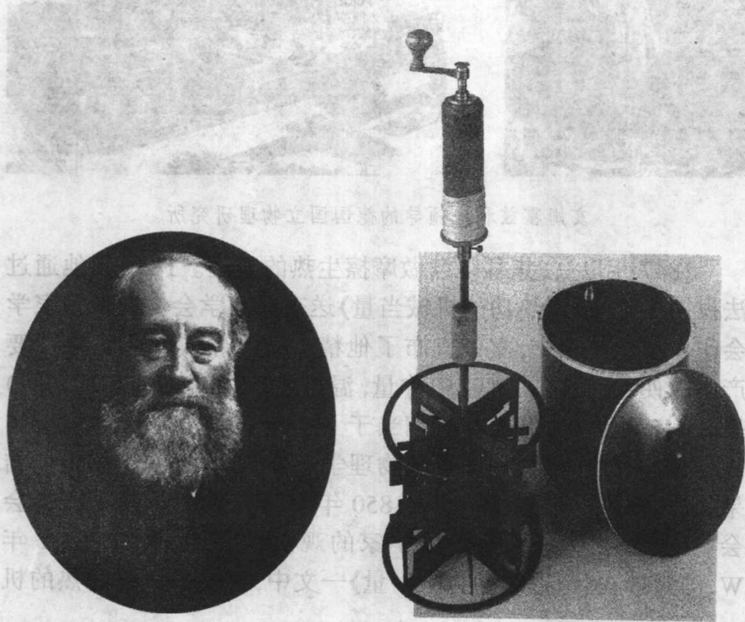
其中他把无机自然界的各种能量转换归结为服从一条总的规律:“在所有化学物理过程中,已知力是一恒量。”“已知力”一词代表所讨论的系统(显然是指封闭系统)已知的能量储备量。迈耶通过振动描绘了机械能转换成热能,通过伽伐尼电池描绘了电能转换成化学能。迈耶的主要思想是,“力”能够多方面地转换,世界上的一切是由能量的转换而相互联系起来的。机械运动中的势能可以变换,如在下降过程中可以变为动能;在发生弹性碰撞时动能可以变为大小相同的其他形式的动能或势能;在变形、撞击和摩擦时变为热能。热机中热能可以变为机械能,可以通过热传导传递出去,也可以变为化学能引起化学反应,或者相反由化学能取得热能(燃烧)。化学能可以变为伽伐尼电流,电流可以形成化学能。电在导线中可变为热,在电磁吸引力下变为机械能,热可变为电,在电磁感应过程中机械能变为电能、机械能等。简单地说迈耶考虑了当时所有已知能量形式的转换,描绘了自然界包括生物机体在内的热量循环。尽管迈耶的研究缺乏准确的数量计算(除了热功当量的计算以外)和缺乏实验的证实,还有用词不准(用“力”代替了能量)等缺点,他的能量转换图景在后来的科学发展中只是进一步明确和作了补充,而没有被推翻。迈耶的功绩在于他首先以普遍的、自然科学的形式作出了能量守恒和转换定律的定义,并说明了它对自然科学的普遍意义。

但是好多年内,迈耶的工作不仅没有得到人们的重视,反而受到一些著名物理学家的反对。由于他的思想不合乎当时的流行观念,受到人们的诽谤和讥笑,使他精神上受到很大刺激,加上其他的不幸遭遇,于 1849 年跳楼自杀未遂。在健康有所好转之后,1851 年他又写论文出版,此后不久,又被关进精神病院,受了许多折磨。直到 1853 后病情才有所好转,但精神状态始终未完全恢复。

英国物理学家焦耳与迈耶同时开始能量转换的研究,1841 年,他发表了论述伽伐尼电流释放热量的论文,文中提出了计算

热量与电流大小的关系式。以后他决定探求机械能与热量的关系，他先用感应器将机械能转换为电能，然后按上述关系式将电能转换为热能。1843 年，他宣读了论文《论电磁的热效应和热的机械值》，文中他得到的热功当量为 4.508 焦/卡(J/cal)。后来焦耳用膨胀的气体进行一系列实验，得出热功当量为 4.184 J/cal，但他的结果不被重视，英国皇家学会有时拒绝让他宣读论文，即使宣读，听众的反应也是怀疑和不信任。但他继续做实验。1847 年，他又申请在英国学术协会会议上宣读论文，但协会主席不让宣读，只让他介绍他的测定热功当量的新实验，即用铜制翼轮来搅动水，使水温升高，而转动翼轮的动力用砝码的下降来提供。对这个发言原不准备讨论，如果不是 W. 汤姆孙站起来发言，这次报告可能仍不会引起人们的注意。

W. 汤姆孙当时已有较高的学术地位。他虽然只有 23 岁，



焦耳(1818—1889)和他的热功当量测量装置

已在剑桥大学完成学业，并在巴黎雷诺实验室工作过。他于1845年(21岁)回到苏格兰，在格拉斯哥得到自然哲学教授职位，并在那里创建了可能是英国第一个学生用的实验室。

对于热，汤姆孙相信热质学说，他早就想站起来反对焦耳的发言。但当他仔细地听了一会之后，他感到焦耳的报告似乎也包含有一部分真理，并且作了重要的实验测定，所以在焦耳讲完之后他提出了一些问题。正因为如此，焦耳的发言才引起人们的重视。但是当时包括W.汤姆孙和法拉第在内的大部分物理学家仍对焦耳的结论表示怀疑。W.汤姆孙在1848年的论文仍坚持热(热质)不能转化为机械效应，反对焦耳的结论。




亥姆霍兹和他领导的德国国立物理研究所

1847年以后，焦耳继续做摩擦生热的实验。1849年他通过法拉第把论文《论热功的机械当量》送交皇家学会。这次皇家学会印发了他的论文，文中宣布了他精心做的新实验的结果："要产生能使1磅水(在真空中称量，温度在55°F① 到60°F之间)提高1°F的热量，需要花费相当于772磅重物下降1英尺所作的机械功。"这个结果，同英国物理学家罗兰在1879年所得的结果相比，误差不超过1/400。1850年焦耳当选为英国皇家学会会员，标志了英国权威的科学家的观点的显著转变。1851年W.汤姆孙在《论热的动力学当量》一文中，接受了焦耳的热的机

① °F是华氏温标，华氏温度(t_F)与摄氏温度(t_C)的换算为：$t_F=\frac{9}{5}t_C+32$。

械当量学说。1853 年他对能量守恒定律作了精确的表述。

1847 年,年轻的德国物理学家亥姆霍兹在完全不了解迈耶和焦耳工作的情况下发表了他的论文《论力的守恒》。他和迈耶一样把论文寄给《物理学与化学杂志》,主编也没有给他发表。亥姆霍兹后来出版了单独的小册子。他认为质点在其大小仅仅取决于距离的吸引力和排斥力的作用下运动时,“应力”数量的损失恒等于“活力”的增量,而前者的增量则恒等于后者的损失,因而所有活力与应力之和是常量。亥姆霍兹说的“应力”就是位(势)能,“活力”就是动能。这样,他得到了在任何密闭物理系统中的势能和动能守恒定理。在这里,亥姆霍兹认为能量的主要形式是机械能。后来,他又研究了能量的具体形式。他从机械能的形式研究了具有重力的物质的势能,运动在理想液体和固体中的传递,弹性固体和液体中的波动。在这里他还列入了光波,并发现:“当两种波相干涉时,‘活力’一点也不消灭,而只是成为另外一种分布形式”。波能只在吸收过程中减少,此时它变为其他形式的能量,如变为热能和化学能。后来,亥姆霍兹研究了功变热和热变功的现象,取得了焦耳的热功当量数据。他还发现了电容器储能的表达式,证明了导线中释放热量的值,等等。

当时还有其他一些科学家(如萨迪·卡诺)也从不同的角度获得了能量守恒定律。

值得指出的是,当时的物理学家都强调能量值上守恒的一面,把这一定律称为“能量守恒定律”。恩格斯突出地强调了能量在形式(质)上转化的一面,并把定律称为“能量转化与守恒定律”。恩格斯对这一规律的发现给予崇高的评价,把它和达尔文进化论及细胞学说并列为三大自然发现。能量转化与守恒定律这个全面的名称就是恩格斯首先提出来的,自然科学的发展证实了恩格斯的正确看法。现在,能量转化与守恒定律有了更为丰富的内容。

能量转化与守恒定律的发现说明：

(1) 一个定律的发现往往是水到渠成的，是在一定的社会实践的基础上，尽管有些人的工作长期不被重视，到了时候不是这个人就是那个人会发现的。

(2) 一个科学真理要得到人们的承认，要经过长期艰苦曲折的斗争。迈耶、亥姆霍兹被压制；焦耳的工作长期得不到承认，为此他坚持做了近 10 年的实验研究，以大量无可辩驳的精确的实验结果迫使权威人士承认他的结论。所以，从事科学事业一定要有“为真理而斗争”的精神。

热力学定律形成的回顾

能量守恒与转化定律的发现，导致了把热看作是机械运动的观念，以这一观念为基础的热理论称为热力学理论。正因为如此，在这一理论中能量守恒与转化定律被称为热力学第一定律。这是热力学形成的第一阶段。

蒸汽机的应用使工业生产大大发展，但效率很低。当时，英国的工程师大多是自学的，只凭实践经验和灵巧的技术在摸索和试验中改进蒸汽机，而法国的理论科学家和工程师则多是在多科性工艺学院中培养出来的。他们更多地从事着蒸汽机理论和一般机器理论的研究。其中的突出代表是萨迪·卡诺。

1814 年，18 岁的萨迪·卡诺成为一位军事工程师，从事研究工作。他的父亲是拿破仑的国防部长，1828 年因拿破仑失败而被流放，萨迪·卡诺也退役了，1832 年死于霍乱，年仅 36 岁。1824 年，他总结早期的研究成果，谈到从地球上观察到的许多现象都与热有关，如大气的流动、云的上升、水的流动等。他说，热机的目的就是提供动力，解决人们的各种需要，但是与机器产生的功相比，燃料的消耗太多了。他研究了理想热机，确立了以下的重要定理：“凡是有温差的地方就有可能产生动力。反之，凡是消耗动力的地方，就有可能产生温差。”卡诺的这一定理实际上就是热力学第二定律的一种表述方式。卡诺提出了这样的问题，即在这一温差下所产生的动力有没有最大限度？推论的

结果是有这样的限度的，否则就可能有永动机，而不可能有永动机则是卡诺分析的重要结论。他虽然信奉热质说，但实际依据还是能量守恒定律。为了确定最大的功，卡诺研究了某种理想的循环过程——卡诺循环。卡诺引入的热力学的这种循环方法在现代热力学中获得了广泛的应用。



卡诺(1796—1832)
法国工程师

卡诺在研究工作中已经了解到热质说的缺点。他说，现代热的理论“应该承认，对于我们来说并不是一种坚信不移的理论”。他十分明确地指出内燃机比蒸汽机经济，“首先用泵压缩空气，再使空气通过完全密闭的燃烧室。同时用易于实现的设备往燃烧室送小股的燃料，然后迫使空气在带活塞的气缸或其他任何膨胀容器里作功，最后将空气排入大气……”这些明确的想法说明卡诺已很了解热工学的热力基础，他迟早会与热质说决裂。但是卡诺的死妨碍了他建立热力学理论。从他死后遗留下来的手稿中可以发现，他已经认为热是一种运动，但那时热力学理论的建立已基本上完成了。

热力学理论的创立者是德国物理学家克劳修斯、英国物理学家汤姆孙和英国工程师兰金。1850 年，克劳修斯发表了自己的第一篇著作，1864～1867 年出版了他的热力学理论专著文集，1876 年出版了《热力学理论》第一卷。汤姆孙的论文“关于热的动力学理论”于 1851 年发表，1852 年又陆续发表了他的关于热力学第二定律的论文。从 1851 年起，兰金的文章发表，揭

示了热力学理论的重要概念，首先是功和能的重要概念。

在汤姆孙和克劳修斯的著作中均阐明了这样的观点："热本身并不表现为物质，而是机械效应的动力形式"，或者"热是某种运动"。根据焦耳的实验，他们都准确地表达了热力学第一定律。例如，克劳修斯指出："可以把功转化为热，反过来也可以把热转变为功，并且关于这些量值彼此始终是成比例的。"

汤姆孙和克劳修斯在深入研究了热力循环过程后指出，任何机械都必须满足热力学第一定律，但是满足第一定律的"机械"并非都是可以实现的。克劳修斯说："热量不会由较冷的物体自然而然地转到较热的物体上。"他在解释"自然而然"一词时说，这是个从温度高的物体转向温度低的物体的过程，没有补偿的相反过程是不可能的。汤姆孙则用下述的另一种表述来说明同一个原理："不可能在非生命物质活动的帮助下，离开任何物质材料，用将其冷却到最低温度之下的途径，从周围物体中得到机械功。"他补充道："如果我们不承认这个公理在一切温度下的有效性，那么我们就不得不认为，能够在运动中引入一个无意识的机器，并且借助于大海和陆地的冷却而得到任何数量的机械功，直到陆地、海洋或直到整个物质世界的全部热量耗尽为止。"克劳修斯和汤姆孙的这些表述就是热力学第二定律的内容。

克劳修斯还引进了一个新的物理量——熵。它与能是相关的，都表示运动转化的能力。能越大，运动转化的能力越大；能越小，越稳定，运动越不容易转化。熵却从反面，即运动不能转化的一面来量度运动转化的能力，表示运动丧失转化能力的程度。在没有外界作用的情况下，一个系统的熵越大，越接近平衡状态，越不能转化。自然界中任何实际的物理过程，熵总要增加，理想的过程，熵才不变。熵减少的过程是不可能的。或者严格地讲，其可能性是微乎其微的。

由于在经典力学中所得到的基本运动定律对于未来和过去都是一样的，对时间来讲是对称的，这助长了形而上学机械论的

观点，而由此得出：宇宙永远以同样的形式存在着。然而热力学第二定律却揭示出自发过程的不可逆性，运动的转化对于时间的增加方向和减少方向具有质的不守恒性，其运动规律对于时间是不对称的。熵这个物理量也与物理学上其他许多概念不同，它描写的物体系统的状态不是固定不变的、僵死的，而是表现出某种发展的倾向。

热力学第二定律从一个侧面表明了自然界中某些局部过程的不可逆性，这在物理学理论发展中是一个重大的进步。但是，汤姆孙、克劳修斯等却把它外推到整个宇宙，得出宇宙“热寂”的结论。那么，人们自然提出了问题，一开始，作为冷却的起点的最初的炽热状态是如何造成的呢？只能靠上帝了。西方一些科学家认为，科学只能说明“是什么”，而“为什么”是这样呢？只有乞求上帝了。所以诸如牛顿的“第一推动力”，这里的“第一炽热”，以至整个宇宙的起源都只能由上帝去解决了。事实上，物理学的发展可以解决这一问题，例如宇宙的起源问题已有理论，也有一定的实验验证，宇宙中熵增加的过程必然与熵减少的过程不可分割地联系着。地球上以及人们有限认识范围中的熵增并不一定表示整个宇宙的熵增。有趣的是，地球上生物进化的过程往往是向熵减的方向进行的，所以可以想到在一定的条件下，宇宙中一定也有熵减过程。

4.2 热力学物理基础

4.2.1 几个基本物理概念

热力学的任务是从能量观点出发，分析研究在物态变化过程中有关热功转换的关系和条件等问题。

本节先对功、能量、内能(国家标准中定名为热力学能)等重要概念以及三者之间的关系，作简要说明。在热力学中，一般常把所研究的物体(气体、液体和固体)或一组物体，称为热力学系

统或简称系统。在热力学中往往不考虑系统整体的机械运动。无数事实证明,热力学系统状态的变化,总是通过外界对系统作功,或向系统传递热量,或两者兼施并用来完成。例如,一杯水,可以通过加热,用传递热量的方法,从某一温度升高到另一温度;也可以用搅拌作功的方法,使这杯水升高到同一温度。前者是通过传递热量来完成的;后者是通过外界作功来完成的。两种方式虽然不同,但是都能导致相同的状态变化,因此,作功和传递热量在这一点上是等效的。过去,习惯上,以焦耳作为功的单位,以卡作为热量的单位。根据著名的焦耳热功当量实验,得出热功之间的当量关系,即 1 卡 = 4.186 焦耳。在国际单位制中,功和热量都用焦[耳](J)作单位。

实验证明,系统状态发生变化时,只要初、末状态给定,则不论经历的过程有何不同,外界对系统所作的功和向系统所传递热量的总和,总是恒定不变的。我们知道,对一系统作功将使系统的能量有所增加;又根据热功的等效性,可知对系统传递热量,也将使系统的能量有所增加。由此看来,热力学系统在一定状态下,应具有一定的能量,叫做热力学系统的"内能"。上述实验事实正是表明:内能的改变量只决定于初末两个状态,而与所经历的过程无关。换句话说,内能是系统状态的单值函数。从分子运动论的观点来说,系统的内能就是系统中所有的分子热运动的能量和分子与分子间相互作用的势能的总和。

应该指出,"作功"和"传递热量"虽有其等效的一面,但在本质上仍然存在着区别。"作功"是通过物体作宏观位移来完成的,所起的作用是物体的有规则运动与系统内分子无规则运动之间的转换,从而改变系统的内能。"传递热量"是通过分子之间的相互作用来完成的,所起的作用是系统外物体的分子无规则运动与系统内分子无规则运动之间的转换,从而也改变系统的内能。

下面,我们要介绍热力学的过程,我们所讨论的热力学的过程都是准静态过程,所谓准静态过程,就是系统所经历的中间状

态都无限接近于平衡状态的变化过程。应该认识到，平衡和过程是两个对立的概念：系统处于平衡时，就不可能发生状态的变化过程；反之，既然有过程发生，就谈不上平衡了。实际过程都不可能真正是准静态过程。例如，用加热的方法使气体的温度由 T_1 升高到 T_2。如果外界温度比气体温度高出一有限值，那么在加热过程中，与外界接近的那部分气体，其温度总是高于距离外界较远的那部分气体，因而中间状态不可能是平衡状态，这过程不会是准静态过程。为了使系统的温度由 T_1 升到 T_2 的过程是一准静态过程，就必须采用温度极为相近的很多物体（例如装有大量水的很多水箱）作为中间热源。这些热源（如这里的水箱）的温度分别是 $T_1, T_1+\mathrm{d}T, T_1+2\mathrm{d}T, \cdots, T_2-\mathrm{d}T, T_2$（图 4.2）。其中 $\mathrm{d}T$ 是无限小的量，代表极为微小的温度差。我们把温度 T_1 的系统与温度为 $T_1+\mathrm{d}T$ 的热源相接触，系统的温度也将升到 $T_1+\mathrm{d}T$ 而与热源建立热平衡。然后，再把系统移到温度为 $T_1+2\mathrm{d}T$ 的热源上，使系统的温度升到 $T_1+2\mathrm{d}T$，而与这一热源建立热平衡。依次类推，直到系统的温度升到 T_2 为止。由于所有热量的传递都是在系统和热源的温度相差为无限小的情形下进行的，所以，这个温度升高的过程无限接近于准静态过程。由此可见，准静态过程只是实际过程的抽象。而且，这种过程的进行一定是无限缓慢的。热力学的研究是以准静态过程的研究为基础的。把理想的准静态过程弄清楚了，将有助于对实际的非静态过程的探讨。

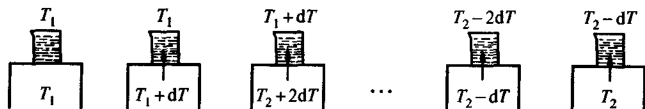


图 4.2 一系列有微小温度差的恒温热源

4.2.2 热力学第一定律

在一般的情况下，当系统状态发生变化时，作功和传递热量往往是同时存在的。如果有一系统，外界对系统传递的热量为

Q,系统从内能为 E_1 的状态(初状态),改变到内能为 E_2 的状态(末状态),同时系统对外作功为 A,那么,对系统而言,根据能量守恒有

$$Q = E_2 - E_1 + A \tag{4.1}$$

上式就是热力学第一定律的数学表达式(式中各量都用同一单位——焦[耳])。热力学第一定律说明:外界对系统所传递的热量,一部分使系统的内能增加,一部分用于系统对外作功。显然,热力学第一定律就是包括热量在内的能量守恒和转换定律。

式(4.1)中,Q、$(E_2 - E_1)$ 和 A 可以是正值,也可以是负值。一般规定,系统从外界吸取热量时 Q 为正,向外界放出热量时 Q 为负;系统对外界作功时 A 为正,外界对系统作功时 A 为负;系统内能增加时 $(E_2 - E_1)$ 为正,内能减少时 $(E_2 - E_1)$ 为负。

对于状态的微小变化过程,热力学第一定律可写为

$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}E + \mathrm{d}A \tag{4.2}$$

热力学第一定律是在 19 世纪 40 年代,确定了热功当量以后,才建立起来的。在这以前,有人企图设计一种永动机,使系统不断地经历状态变化而仍回到初始状态($E_2 - E_1 = 0$),同时在这过程中,无需外界任何能量的供给而能不断地对外作功。这种永动机称为第一类永动机。所有这种企图,经无数次的尝试,都失败了。热力学第一定律指出,作功必须由能量转换而来。那么,很显然,第一类永动机是不可能造成的。

4.2.3 气体状态方程与等值过程

对气体大量的研究得出的一系列的实验规律,发现不论是怎样的变化,气体的状态最终都是由 p、V、T、n 来决定的,其中 p 为气体的压强,V 为气体占有的体积,T 为气体的温度,而 n 则表示气体的“量”,按照数学上的表示方法,则有

$$p = f(V, T, n)$$

或

$$V=f(p,T,n)$$

在实验研究中，把 n 确定为一定量值，这可以理解为是一定的“质量”，也可以理解为“气体的粒子数一定”等。大量的实验事实表明，无论是什么气体，在压强不太大和温度不太低的条件下，都能较好地遵守下列三个实验定律：

当 T 一定，n 一定时，$V=f(p)$，即 $pV=K_1$——玻意耳定律；

当 p 一定，n 一定时，$V=f(T)$，即 $V=K_2T$——查理定律；

当 V 一定，n 一定时，$p=f(T)$，即 $p=K_3T$——盖吕萨克定律。

若一定量的气体从(p_0, V_0, T_0)状态变为(p、V、T_0)状态再变为(p、V、T)状态时，则由上述各式能推导出以下关系

$$\frac{p_0V_0}{T_0}=\frac{pV}{T}=K \tag{4.3}$$

由于三个实验定律对于理想气体是严格成立的，所以上式也称为理想气体状态方程。若气体的质量为 M，摩尔质量为 μ，且 n 为气体的物质的量(摩尔数)，即 $n=\frac{M}{\mu}$，上式可写成

$$\frac{pV}{T}=\frac{M}{\mu}RT$$

这就是常用的气体状态方程，该式中 R 为普适气体恒量，且有 $R=8.31\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$。

下面讨论热力学第一定律在理想气体的几个典型过程中的应用。

等体过程

等体过程中 V 保持不变，所以 $\mathrm{d}V=0$，则 $\mathrm{d}A=p\mathrm{d}V=0$，则由热力学第一定律有

$$(\mathrm{d}Q)_V=\mathrm{d}E$$

即$(Q)_V=E_2-E_1$。

根据上式可知等体过程中系统对外没有作功，外界传给系统的热量全部用来增加系统的内能。

等温过程

等温过程中，T 保持不变，则 $\mathrm{d}T=0$，由于理想气体的内能只取决于温度，因此等温过程中 $dE=0$，根据热力学第一定律有

$$(\mathrm{d}Q)_T=\mathrm{d}A=p\mathrm{d}V$$

将 $p=\frac{M}{\mu}RT\frac{1}{V}$代入上式，有

$$(\mathrm{d}Q)_T=\frac{M}{\mu}RT\frac{\mathrm{d}V}{V}$$

则

$$Q_T=A=\int_{V_1}^{V_2}\frac{M}{\mu}RT\frac{\mathrm{d}V}{V}=\frac{M}{\mu}RT\ln\frac{V_2}{V_1}=\frac{M}{\mu}RT\ln\frac{p_1}{p_2}$$

上式表明，等温膨胀时，理想气体系统所吸取的热量全部转换为对外所作之功；反之，当等温压缩时，外界对理想气体系统所作的功，全部转换为传给恒温热源的热量。

等压过程

等压过程中 p 保持不变，$\mathrm{d}p=0$，若气体的体积从 V 增加到 $V+\mathrm{d}V$，温度从 T 增加到$T+\mathrm{d}T$，那么气体所作之功为

$$\mathrm{d}A=p\mathrm{d}V=\frac{M}{\mu}R\mathrm{d}T$$

由热力学第一定律可得

$$(\mathrm{d}Q)_p=\mathrm{d}E+\frac{M}{\mu}R\mathrm{d}T$$

则

$$(Q)_p=E_2-E_1+\frac{M}{\mu}R(T_2-T_1)$$

上式表示气体在等压过程中所吸收的热量，一部分转换为内能的增量 E_2-E_1，还有一部分转换为对外所作之功 $\frac{M}{\mu}R(T_2-T_1)$。

由量热学可知，当一物体温度变化 $\mathrm{d}T$ 时，它所吸收或放出

的热量为

$$dQ = Mc\,dT$$

式中 M 是物体的质量，c 是比热容，令 $C = Mc$，C 叫做该物体的热容，$C = dQ/dT$。如果取 1 mol 的物体，相应的热容就称为摩尔热容，用 c_m 来表示，摩尔热容为 $c_m = C/n$，n 为摩尔数。

同一种气体，在不同过程中，有不同量值的热容。最常用的是等体过程和等压过程中的两种热容。这两种过程的热容及相应的摩尔热容为

定容：$$C_V = \frac{(dQ)_V}{dT}, c_{mV} = \frac{C_V}{n}$$

定压：$$C_p = \frac{(dQ)_p}{dT}, c_{mp} = \frac{C_p}{n}$$

在等体过程中，气体吸取的热量全部用来增加自己的内能；在等压过程中，除一部分用来增加气体的内能外，还需另一部分转换为气体反抗外力所作的功。所以要气体升高某一温度，在等压过程中所吸取的热量要比等体过程中为多。由此看来，把两种不同过程中的气体热容加以区分是十分必要的。固体或液体也有这两种热容，但是由于固体或液体的体胀系数很小，因热膨胀而对外所作的功可以忽略不计，所以两种热容的实际差值很小，一般不加区别。

在气体动理论中，气体摩尔热容的实测数据是研究气体的内能、气体分子的运动以及分子内部运动规律性的重要依据。

绝热过程

在不与外界作热量交换的条件下，系统的状态变化过程叫做绝热过程。它的特征是 $dQ = 0$。要实现绝热准静态过程，系统的外壁必须是完全绝热的，过程也应该进行得无限缓慢(图 4.3)，但在自然界中，完全绝热的器

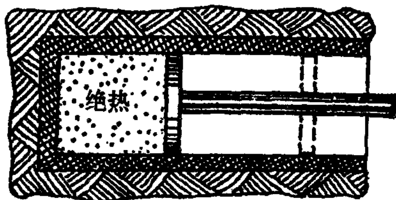


图 4.3　气体的绝热过程

壁是找不到的。因此，实际上所进行的都是近似的绝热过程。例如，气体在杜瓦瓶（通常的热水瓶也是杜瓦瓶）内，或在用绝热材料包起来的容器内，所经历的变化过程，就可看作是近似的绝热过程。又如声波传播时所引起的空气的压缩和膨胀，内燃机中的爆炸过程等，由于这些过程进行得很快，热量来不及与四周交换，也可近似地看作是绝热过程。下面讨论绝热的准静态过程中功和内能转换的情形。

根据绝热过程的特征（$\mathrm{d}Q=0$），由热力学第一定律得

$$\mathrm{d}A=-\mathrm{d}E$$

所以，在绝热过程中，只有在系统内能变化时才能作功。

质量为 M、摩尔质量为 μ 的理想气体，当温度变化 $\mathrm{d}T$ 时，内能变化为

$$\mathrm{d}E=\frac{M}{\mu}C_V\mathrm{d}T$$

于是

$$\mathrm{d}A=-\mathrm{d}E=-\frac{M}{\mu}C_V\mathrm{d}T$$

因为$\left(\frac{M}{\mu}\right)C_V$ 是恒量，所以当气体由初状态（温度为 T_1）绝热地变为末状态（温度为 T_2）的过程中，气体作功为

$$A=-\frac{M}{\mu}C_V(T_2-T_1) \tag{4.4}$$

从上式可以看出，当气体绝热膨胀而对外作功时，气体的内能就要减少，温度就要降低，而压强也在减小。所以在绝热过程中，气体的温度、压强、体积三个参量都同时改变。

可以证明，对于理想气体的绝热准静态过程，在 p,V,T 三个参量中，每两个量之间的相互关系式为

$$pV^{\gamma}=\text{恒量} \tag{4.5}$$

$$V^{\gamma-1}T=\text{恒量} \tag{4.6}$$

$$p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=\text{恒量} \tag{4.7}$$

这些方程称为绝热过程方程，式中 γ 为 C_p 与 C_V 的比值，而恒

量的大小与气体的质量及初始状态有关，并且三个方程中的各恒量均不相同。我们可以按照问题的性质，在三个方程之间任取一个比较方便的来应用。

4.2.4 循环过程与卡诺循环

物质系统经历一系列的中间变化过程又回到初始状态，这样的周而复始的变化过程称为循环过程或简称循环。该系统物质叫做工作物质，也简称工质。由于工作物质的内能是状态的单值函数，所以经历一个循环，回到初始状态时，内能没有改变，这是循环过程的重要特征。如果系统在循环过程中所经历的中间过程都是准静态过程时，可将工作物质的循环过程在 p-V 图上，用一个闭合的曲线来表示，见图 4.4。图中曲线上的箭号表示过程的行进方向，顺时针方向的循环称为正循环，反之，逆时

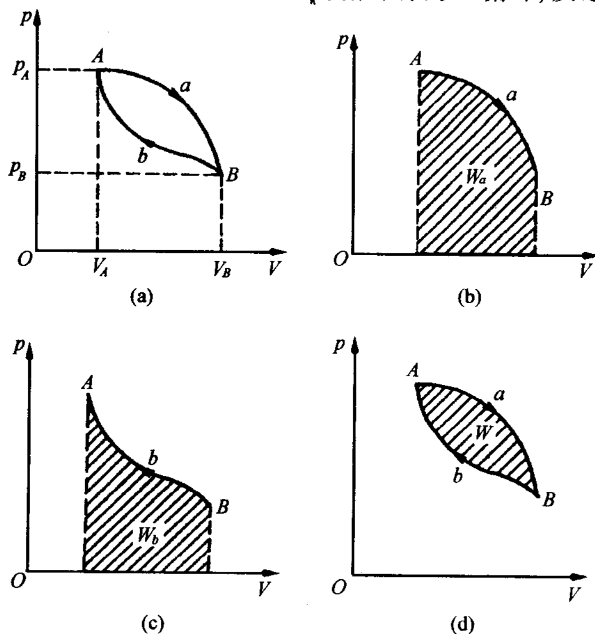


图 4.4 循环过程所作的功

针方向的循环称为逆循环。若系统从状态 A 经 a 到达状态 B 的过程均处于不断膨胀的过程，此时系统对外作功；系统再由状态 B 经过 b 回到状态 A 时，系统均处于压缩过程，此时，外界对系统作功。显然，当系统经一循环过程中所作的净功（系统对外作功和外界对系统作功之和）就等于 p-V 图中，曲线所包围的面积。由热力学第一定律可知，系统所作的净功就等于循环中系统吸热和放热的代数和。

在实践中，往往要求利用工作物质继续不断地把热转化为功，这种装置叫做热机。表面看来，理想气体的等温膨胀过程是最有利的，所吸取的热量可以完全转化为功。但是，只靠单纯的气体膨胀过程来作功的机械是不切实际的。因为气缸的长度总是有限的，气体的膨胀过程就不可能无限制地进行下去。即使不切实际地把气缸做得很长，最终当气体的压强减到与外界的压强相同时，也是不能继续作功的。十分明显，要继续不断地把热转化为功，只有使工作物质从膨胀作功以后的状态，又能回到初始状态，这样，一次再一次地重复进行下去；同时还必须使物质在返回初始状态的过程中，外界压缩工作物质所作的功少于工作物质的膨胀时对外所作的功，这样才能得到工作物质对外所作的净功。这正是正循环，亦称热机循环。

获得低温装置的致冷机也是利用工作物质的循环过程来工作的，不过与热机中工作物质的循环过程恰恰相反，所以逆循环又称致冷机循环。

循环过程的理论是研究热机和致冷机的基本理论。

在 19 世纪初期，热机的应用已很广泛，但是效率很低，因此如何增进热机的效率，就成为理论研究的一个迫切问题。

对此，卡诺做了十分重要的研究工作。卡诺循环过程是 1824 年年轻的工程师卡诺对热机的最大可能效率问题进行理论研究时提出的，卡诺循环的研究，在热力学中是十分重要的，为热力学第二定律的确立起了奠基性的作用。

卡诺循环是在两个温度恒定的热源（一个高温热源，一个低

温热源)中间工作的循环过程。在整个循环中,工作物质只和高温热源或低温热源交换能量。现在我们研究的是由准静态过程组成的卡诺循环。因为是准静态过程,所以在工作物质与温度为 T_1 的高温热源接触的过程中,基本上没有温度差,亦即工作物质与高温热源接触而吸热的过程是一个温度为 T_1 的等温膨胀过程。同样,和温度为 T_2 的低温热源接触而放热的过程是一个温度为 T_2 的等温压缩过程。因为工作物质只与两个热源交换能量,所以,当工作物质脱离两热源时所进行的过程,必然是绝热的准静态过程。总之,卡诺循环是由两个等温过程和两个绝热过程组成的。图 4.5(a)为理想气体卡诺循环的 p-V 图,曲线 $a—b$ 和 $c—d$ 表示温度为 T_1 和 T_2 的两条等温线,曲线 $b—c$ 和 $d—a$ 是两条绝热线。

先讨论以状态 a 为始点,沿闭合曲线 $a—b—c—d—a$ 所作的正循环过程。在整个循环过程中,气体的内能不变,但气体与外界通过传递热量和作功而有能量的交换。在 $a—b—c$ 的膨胀过程中,气体对外所作的功 A_1 是曲线 $a—b—c$ 下面的面积,在 $c—d—a$ 的压缩过程中,外界对气体所作的功 A_2 是曲线 $c—d—a$ 下面的面积。因为 $A_1 > A_2$,所以气体对外所作净功 $A(=A_1-A_2)$就是闭合曲线 $a—b—c—d—a$ 所围的面积。系统与外界热量的交换只存在于气体在等温膨胀过程 $a—b$ 及气体在等温压缩过程 $c—d$ 中,前者从高温热源吸取热量:

$$Q_1 = \frac{M}{\mu} R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

后者向低温热源放出的热量(指热量的绝对值)

$$Q_2 = \frac{M}{\mu} R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

式中的 V_1 和 V_4、V_2 和 V_3 分别在两绝热线上,应用绝热方程有 $T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$ 和 $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$,于是

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} \quad 或 \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

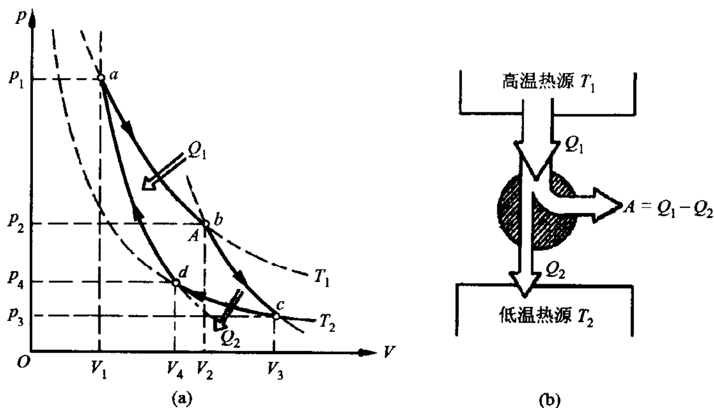


图 4.5　卡诺循环(热机)的 p-V 图及工作示意图

所以

$$Q_2 = \frac{M}{\mu} R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4} = \frac{M}{\mu} R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

取 Q_1 与 Q_2 的比值，可得

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

根据热力学第一定律可知，在每一循环中，高温热源传给气体的热量为 Q_1，其中一部分热量 Q_2 由气体传给低温热源，同时气体对外所作净功为 $A = Q_1 - Q_2$，所以这个循环是热机循环，工作示意图如图 4.5(b)所示。利用这种循环，可以把热不断地转化为功。热机把热转化为功的效率定义：

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

因此卡诺热机的效率为

$$\eta_{卡诺} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

从以上的讨论中可以看出：

(1) 要完成一次卡诺循环必须有高温和低温两个热源(有

时分别称为热源与冷源)；

(2) 卡诺循环的效率只与两个热源的温度有关，高温热源的温度愈高，低温热源的温度愈低，卡诺循环的效率愈大，也就是说当两热源的温度差愈大，从高温热源所吸取的热量 Q_1 的利用价值愈大；

(3) 卡诺循环的效率总是小于 1 的(除非 $T_2=0\text{K}$)。

现在，我们再讨论理想气体以状态 a 为始点，与热机相反方向地沿闭合曲线 $a—d—c—b—a$ 所作的循环过程(图 4.6(a))。显然，气体将从低温热源吸取热量 Q_2，又接受外界对气体所作的功 A，向高温热源传递热量 $Q_1=A+Q_2$。

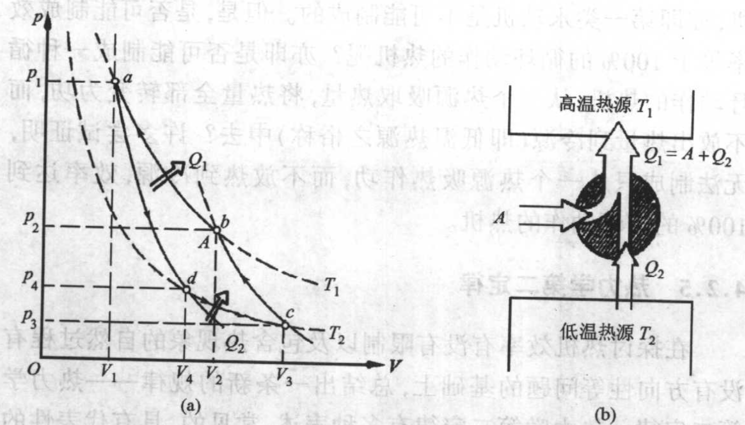


图 4.6　卡诺循环致冷机的 p-V 图及工作示意图

从低温热源吸取热量 Q_2 的结果，将使低温热源(或低温物体)的温度降得更低，这就是致冷机所要求的。应该注意，完成这一循环是有代价的，外界必须消耗功 A。致冷机的功效常用从低温热源中所吸取的热量 Q_2 和所消耗的外功 A 的比值来衡量，这一比值叫做致冷系数

$$\omega=\frac{Q_2}{A}=\frac{Q_2}{Q_1-Q_2}$$

因此卡诺致冷机的致冷系数为

$$\omega_{卡诺} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

从上式可以看出，T_2 愈小，ω 也愈小。这说明要从温度愈低的低温热源中吸取热量，须消耗愈多的外功。

还需指出，致冷机向高温热源所放出的热量 $Q_1(=Q_2+A)$是完全可以利用的，例如可把它当作提供热量的热源使用，这就是所谓的“热泵”，在近代工程上已广泛使用。

上面我们看到，工作物质从高温热源吸取热量，经过卡诺循环总要放出一部分热量到冷源中去，才能回复到初始状态。由热力学第一定律，可以知道，效率大于 100% 的循环动作的热机，亦即第一类永动机是不可能制成的。但是，是否可能制成效率等于 100% 的循环动作的热机呢？亦即是否可能制成一种循环动作的热机；从一个热源吸取热量，将热量全部转变为功，而不放出热量到冷源(即低温热源之俗称)中去？许多尝试证明，无法制成只从一个热源吸热作功，而不放热到冷源，效率达到 100% 的循环动作的热机。

4.2.5 热力学第二定律

在探讨热机效率有没有限制以及包含热现象的自然过程有没有方向性等问题的基础上，总结出一条新的规律——热力学第二定律。热力学第二定律有多种表述，常见的、具有代表性的有两种：一种叙述是由开尔文(Kelvin)首先提出的，通常称为热力学第二定律开尔文叙述。他认为不可能制成这样一种循环动作的热机，只从一个热源吸取热量，使之完全变为有用的功，而其他物体不发生任何变化。这一叙述也就是肯定了任何热机从热源吸取热量作功，总要放出一部分热量到温度较低的冷源，工作物质才能回复到初始状态。

我们应当注意热力学第二定律中“循环动作”几个字。如果工作物质所进行的不是循环过程，那么使一个热源冷却作功而不放出热量是完全可能的。例如在气体等温膨胀中，气体只从



克劳修斯(1822—1888),德国物理学家



开尔文(1824—1907),英国物理学家

一个热源吸热、全部转变为功而不放出任何热量。但如果只是这样作功,工作物质不可能回到初始状态。

从一个热源吸热并将热全部变为功的热机,叫做第二类永动机。有人曾计算过,如果能制成第二类永动机,使它从海水吸热而作功,那么海水的温度只要降低0.01K,所作的功就可供全世界所有工厂千年之用。但是我们却无法制成这种热机。当然,在确立了热力学第二定律以后,第二类永动机显然只是一种幻想而已。

另一种叙述是由克劳修斯提出,他在观察自然现象时发现,热量的传递也有一种特殊的规律,这就是:热量不能自动地从低温物体传向高温物体。这称为热力学第二定律的克劳修斯叙述。在这一叙述中,我们应当注意"自动"两字。所谓热量不能自动地从低温物体向高温物体,意思是:热量直接从低温物体传向高温物体,是不可能的。借助于某种循环动作的机器,其惟一结果是使热量间接地从低温物体传向高温物体,而外界不发生任何变化,同样是不可能的。我们知道,通过致冷机,热量可以

从低温物体传到高温物体,但此时外界必须作功,因此这就不是热量"自动"地从低温物体传向高温物体。

通过摩擦,功可以全部变为热。热力学第二定律却说明热量不能通过一循环过程全部变成功。热量可以从高温物体自动传向低温物体,而热力学第二定律却说明热量不能自动从低温物体传向高温物体。热力学第一定律说明在任何过程中能量必须守恒,热力学第二定律却说明并非所有能量守恒的过程均能实现。热力学第二定律是反映自然界过程进行的方向和条件的规律,它指出自然界中出现的过程是有方向性的,某些方向的过程可以实现,而另一方向的过程则不能实现。在热力学中,第二定律和第一定律相辅相成,缺一不可。

从这里也可以看到,为什么在热力学中要把作功及传递热量这两种能量传递方式加以区别,这就是因为热量具有只能自动从高温物体传向低温物体的方向性。

热力学第二定律的这两种叙述,表面上看来并无关系,是各自独立的,其实两者是等价的、统一的。现证明如下:

如果克劳修斯的叙述不成立,亦即允许有一循环 E,产生的惟一效果是使热量 Q_2 从低温热源输至高温热源(图 4.7),那么,我们再利用一个卡诺循环 B,从高温热源吸取热量 Q_1,放出热量 Q_2 给低温热源,对外作功 $A = Q_1 - Q_2$。把这两个循环总

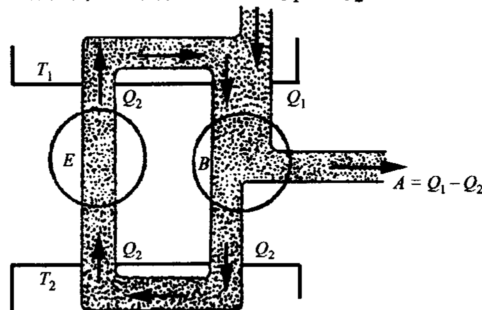


图 4.7　违背了热力学第二定律的克劳修斯叙述,也就是违背了开尔文叙述

的构成一部复合热机时，则完成从热源取得热量 $Q_1 - Q_2$，把它全部转化为功，而低温热源不发生任何变化。这就违背开尔文的叙述。反过来，如果开尔文的叙述不成立，亦即允许有一热机 C 可以只从高温热源取得热量 Q_1 后，使它全部转化为功（图 4.8），那么，可再利用一个卡诺循环 D 接受 C 所作的功 $A(=Q_1)$，使它从低温热源取得热量 Q_2，输出热量 $Q_1 + Q_2$ 给高温热源。把这两个循环总的构成一部复合致冷机，则是外界没有对外作功，而它把热量 Q_2 从低温热源输到高温热源。这也就违背了克劳修斯的叙述。

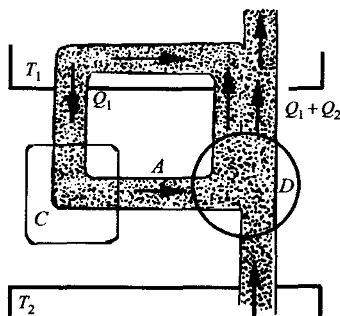


图 4.8 违背了热力学第二定律的开尔文叙述，也就是违背了克劳修斯叙述

克劳修斯叙述指出了热传导过程中的不可逆性，开尔文叙述指出了热功转化过程中的不可逆性。由两种叙述的一致性，可知这两种不可逆性存在着内在的联系，由其中一种过程的不可逆性可以推断另一种过程的不可逆性。事实上自然界中存在着无数的不可逆过程，一切不可逆过程之间都存在着这种内在联系。我们在下面将对此作进一步的讨论。

可逆过程和不可逆过程

为了进一步研究热力学第二定律的含义和热力学过程方向性的问题，有必要介绍可逆过程和不可逆过程的概念。

设在某一过程 P 中，一物体从状态 A 变为状态 B。如果我们能使物体进行逆向变化，从状态 B 回复到初状态 A，而且当

物体回复到初状态 A 时,周围一切也都各自回复原状,过程 P 就称为可逆过程。如果物体不能回复到原状态 A,或当物体回复到初状态 A 时而周围并不能回复原状,那么过程 P 称为不可逆过程。

选取一单摆,如果不受到空气阻力及其他摩擦力的作用,当它离开某一位置后,经过一个周期,又回到原来的位置,而周围一切都无变化,因此单摆的摆动是一可逆过程。由此可以看出,单纯的、无机械能耗散的机械运动过程是可逆过程。

现在我们分析热力学过程的性质。例如,通过摩擦,功变为热量的过程。根据热力学第二定律,热量不可能通过循环过程全部变为功,因此,功通过摩擦转换为热量的过程就是一不可逆过程。又如热量直接从高温物体传向低温物体也是一不可逆过程,因为,根据热力学第二定律,热量不能再自动地从低温物体传向高温物体。

以上两个例子是可以直接用热力学第二定律来判明的不可逆过程。现在我们再举一个不可逆过程的例子,它们要间接用热力学第二定律来判明。

设有一容器分为 A、B 两室,A 室中贮有理想气体,B 室中为真空(图 4.9)。如果半隔板抽开,A 室中的气体将向 B 室膨

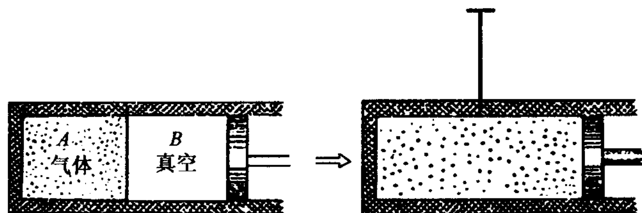


图 4.9　气体的自由膨胀

胀,这是气体对真空的自由膨胀,最后气体将均匀分布于 A、B 两室中,温度与原来温度相同。气体膨胀后,我们仍可用活塞将气体等温地压回 A 室,使气体回到初始状态;不过应该注意,此

时我们必须对气体作功，所作的功转化为气体向外界传出的热量。根据热力学第二定律，我们无法通过循环过程再将这热量完全转化为功，所有气体对真空的自由膨胀过程是不可逆过程。

气体迅速膨胀的过程也是不可逆的。气缸中气体迅速膨胀时，活塞附近气体的压强小于气体内部的压强。设气体内部的压强为 p，气体迅速膨胀一微小体积 ΔV，则气体所作的功 A_1 将小于 $p\Delta V$。反之，将气体压回原来体积，活塞附近气体的压强不能小于气体内部的压强，外界所作的功 A_2 不能小于 $p\Delta V$。因此，迅速膨胀后，我们虽然可以将气体压缩，使它回到原来状态，但外界必须多作了功 $A_2 - A_1$；这功将增加气体的内能，而后以热量形式放出。根据热力学第二定律，不能通过循环过程再将这部分热量全部变为功，所以气体迅速膨胀的过程也是不可逆过程。只有当气体膨胀非常缓慢，活塞附近的压强非常接近于气体内部的压强力时，气体膨胀一微小体积 ΔV 所作的功恰好等于 $p\Delta V$，那么才又可能非常缓慢地对气体作功 $p\Delta V$，将气体压回原来体积。所以，只有无限缓慢，亦即准静态的膨胀过程，才是可逆的膨胀过程。同理，我们也可以证明，只有无限缓慢的，亦即准静态的压缩过程，才是可逆的压缩过程。

由上述可知，在热力学中，过程的可逆与否和系统所经历的中间状态是否平衡密切相关。只有过程进行得无限地缓慢，没有由于摩擦等引起机械能的耗能，由一系列无限接近于平衡状态的中间状态所组成的准静态过程，才是可逆过程。当然，这在实际情况中是办不到的。我们可以实现的只是与可逆过程非常接近的过程，也就是说可逆过程不过是实际过程在某种精确度上的极限情形而已。

实践中遇到的一切过程都是不可逆过程，或者说只是或多或少地接近可逆过程。研究可逆过程，也就是研究从实际情况中抽象出来的理想情况，可以基本上掌握实际过程的规则性，并可由此出发去进一步找寻实际过程的更精确的规律。

自然现象中的不可逆过程是多种多样的。各种不可逆过程

之间存在着内在的联系。例如，由热功转化的不可逆性证明气体自由膨胀的不可逆性，就是反映了这种内在联系。热力学第二定律的含义和实质就在于总结性地指明了这种内在联系。

卡诺循环中每个过程都是准静态过程，所以卡诺循环是理想的可逆循环。现在，可以进一步了解这一理想循环的重大意义。

从热力学第二定律可以证明热机理论中非常重要的卡诺定理，它指出：

(1) 在相同的高温热源（温度为 T_1）与相同的低温热源（温度为 T_2）之间工作的一切可逆机（即工作物质的循环是可逆的），不论用什么工作物质，效率相等，都等于$\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right)$。

(2) 在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切不可逆机（即工作物质的循环是不可逆的）的效率，不可能等于（实际上是小于）可逆机，即

$$\eta \leqslant 1-\frac{T_2}{T_1}$$

卡诺定理指出了提高热机效率的途径。就过程而论，应当使实际的不可逆机尽量地接近可逆机。就热源的温度来说，应该尽量地提高两热源的温度差，这时，热机效率愈高，热量可利用的价值也愈大。但是应该指出：在实际热机中，如蒸汽机等，低温热源的温度，就是用来冷却蒸汽的冷凝器的温度。想获得更低的低温热源温度，就必须用致冷机，而致冷机要消耗外功，因此用降低低温热源的温度来提高热机的效率是不经济的，所以要提高热机的效率应当从提高高温热源的温度着手。

熵

现假定在两热源间（高温热源为 T_1，低温热源为 T_2）有两个热机在工作，一为可逆的卡诺机，一为不可逆的热机，由前面的讨论可知，卡诺热机的效率一定大于非卡诺热机，故有

$$1-\frac{T_2}{T_1} \geqslant 1-\frac{|Q_2|}{Q_1}$$

式中取等号时，表示两热机均是可逆机的情况。考虑到放热 Q_2 本身为负值，将上式整理后可得

$$\frac{Q_2}{T_2}+\frac{Q_1}{T_1}\leqslant 0$$

式中 Q/T 称热温比。上式表明在这样的循环系统热温比的总和总是小于或等于零。

对于任意循环过程（包括可逆或不可逆的）可将它看成由一系列卡诺微循环组成（图 4.10），利用上式关系对所有的微循环相加，则有

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta Q_i}{T_i}\leqslant 0$$

式中 ΔQ_i 是系统从温度为 T_i 的热源吸收的热量。当 $n\to\infty$ 时上式可写成

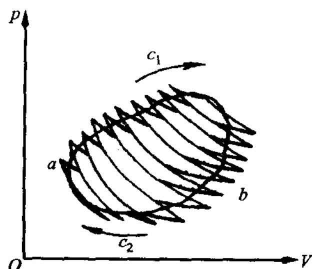


图 4.10 任意可逆循环可看作由无限多个卡诺循环组成

$$\oint\frac{\mathrm{d}Q}{T}\leqslant 0$$

对可逆循环过程而言 $\oint\frac{\mathrm{d}Q}{T}=0$。因此对循环中任意 a,b 两点间的过程来说，其热温比 $\mathrm{d}Q/T$ 的积分值只与始末状态有关与系统经历的中间状态无关。令 $\int_a^b\frac{\mathrm{d}Q}{T}=S_b-S_a$，式中 S_a、S_b 称为系统始末状态的熵，$\Delta S=S_b-S_a$ 称熵变。显然熵是状态的函数，但它只是一个相对值。

对不可逆循环过程而言，$\oint\frac{\mathrm{d}Q}{T}<0$，假如该不可逆循环的一部分 acb 过程是不可逆的，另一部分 bda 是可逆的（见图 4.11），则有

$$\int_{acb}\frac{\mathrm{d}Q}{T}+\int_{bda}\frac{\mathrm{d}Q}{T}<0$$

因 bda 是可逆过程有

$$\int_{bda}\frac{\mathrm{d}Q}{T}=-\int_{abd}\frac{\mathrm{d}Q}{T}=S_b-S_a$$

故有

$$\int_{acb}\frac{\mathrm{d}Q}{T}<\int_{adb}\frac{\mathrm{d}Q}{T}$$

即

$$S_b-S_a>\int_{acb}\frac{\mathrm{d}Q}{T}$$

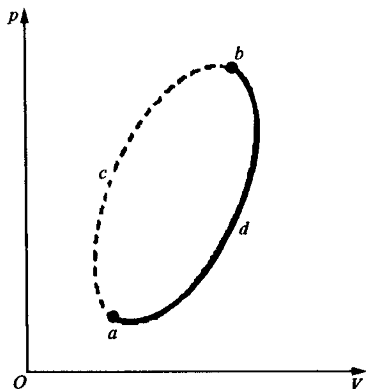


图 4.11　不可逆循环过程

上式表明，在任意不可逆过程中，系统的熵变总是大于过程中系统热温比的积分。

必须指出在相同的 a、b 两状态间，尽管可逆过程和不可逆过程的热温比的积分形式相同，但是它们的数值是不同的。

对于一个与外界没有热量交换的系统(即过程是绝热的)，有

可逆过程　　　　　　$\Delta S=0$

不可逆过程　　　　　$\Delta S>0$

就地球这个系统而言，由于人们的生产、生活活动都是一些不可逆过程。因此，若将地球视作一个与外界没有能量和物质交换的系统(即孤立系统)时，系统的熵是增加的。但是，如图 4.12，地球事实上并不是孤立的，它不断地从外界获得能量和物质，也不断地向外界送出能量。这时，如何来判断地球系统的熵变呢？为了简化起见，只考虑太阳向地球输入的能量，由于太阳的辐射，每秒有 1.7×10^{17} 焦的能量输入地球，使地表、海岸等大约保持在温度 $T_1=300\mathrm{K}$，同时作为太阳风的氢等离子体也会送来一些能量，对这部分由于物质输入带来的能量，由于氢等离

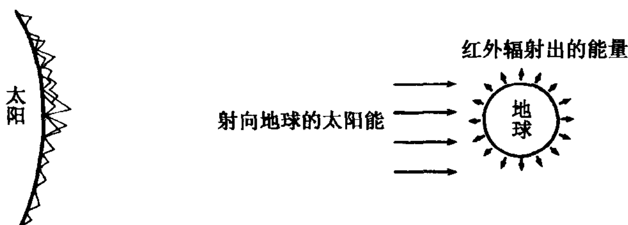


图 4.12　地球温度保持一定的原理图

子体的密度仅 1 粒/cm^3 的量级，所对应的能量很小，与辐射能量相比可忽略。另一方面地球外层高空的温度约为 $T_2=4K$，地球随着整个宇宙的膨胀也不断向宇宙空间辐射能量。因此，每当地面把从太阳辐射来的热量 Q，由高空向宇宙空间释放时，便会使地球系统的熵减少约 $\left|\frac{Q}{T_1}-\frac{Q}{T_2}\right|$。从这一角度讲，太阳给地球送来了负的熵变，由于这种熵变是系统与外界交换中形成的，常常称它为熵流。

在产业革命之前，从太阳到地球上的熵流值与地球上向空间放出的熵流值相比其绝对值要大得多；但是产业革命以后，出现使用的石油、煤的燃料的增加，仅以石油、煤作为主要燃料来说，人类每秒钟使用的能量为 3.2×10^{13}焦，当然，这比起太阳每秒钟辐射过来的能量(1.7×10^{17}焦)还是非常小的，因此全球的熵流没有大的变化。

对于熵的讨论，若不把考察的系统明确时，则会产生混乱，前面我们选了地球作为封闭系统，对地球来说，从太阳到地球与从地球到宇宙空间的熵流有较大的差值，则可得出地球有负的熵流进入。然而，若把考察方法变换一下，若把太阳和地球作为一个封闭的绝热系统的宇宙空间，则在系统内，由于热流是个非可逆过程，则熵流是增加的。则它也应不违反热力学第二定律。

再从人类社会开放系统来看，系统与外界不仅有热量交换而且有质量的交换，石油、煤的燃烧放出的热量和太阳辐射一样都起着给人类提供负熵变的作用。若有物质流入时，可将其化

学势换算成负的热量，则对应有负的熵流流入，则由熵的定义可得如下定义的表示式

$$\Delta S = \int_V \frac{dQ + dQ' - d\widetilde{\mu}}{T} dV$$

其中的$\widetilde{\mu}$是单位体积中的物质的化学势，而 $-d\widetilde{\mu}$则是在体积 dV 中的化学能的流入量。

特别是在产业革命以后，人类懂得开发和利用地下埋藏的石油和煤炭。由于大量的开采和利用，由太阳而得的负熵流再加上石油、煤炭产生的负熵流使人类生存和生产活动得以持续，同时也为社会熵变的改变作了贡献，从全球的角度来看，来自太阳到地球的负熵流比从地球流出的负熵流要大，燃料虽作了贡献，但还只是很小的一部分。然而问题是资源是有限的，能持续到何时为止，这是人们要考虑的问题。当然，进一步考虑想利用铀、钍等的原子能，矿山资源的铀、钍的总量并不大，将其用于人类生产中的量也不会太多，近来由于高速反应堆的使用，以及能量变换效率的有效的提高，已经有了一条能使熵产生下降的发展道路。现在除了开采铀矿外，还进行了收集海水中铀的工作，但是利用核分裂产生的原子能也是和化石类燃料一样是有限制的，若是把核聚变的能量加以控制应用，将对人类文明和生产起着更大的作用。

4.3 “热寂论”问题

克劳修斯在他 1865 年的论文第一次引进了熵函数，并证明了绝热过程后熵的增加，但他在这篇论文的最后却把热力学第一定律和第二定律概括为：

(1) 宇宙的能量是一常数；

(2) 宇宙的熵趋于极大。

宇宙的熵趋于极大表示什么意思呢？克劳修斯解释说：“宇宙越是接近这个熵是极大的极限状态，进一步变化的能力就越

小,如果最后完全达到了这个状态,那就任何进一步的变化都不会发生了,这时宇宙就会进入一个死寂的永恒状态。"因为克劳修斯认为宇宙最终要进入"死寂的永恒状态",对此也将它称之为"热寂论"。

"热寂论"问世以来,引起了各方面的关注与争论,推动着物理学家与哲学家深入地思考热运动中的有关问题。

我们认为"热寂论"并没有真正的科学根据,其理由是:

(1) 非平衡状态的熵趋于极大,这是对孤立系统而言的。孤立系统本来只是一个理想化的抽象,指的是外界对它影响较弱的有限尺寸的系统。目前,我们没有什么根据说宇宙是这样一个孤立系统。

(2) 过去认为,非平衡态的自发过程总是由有序趋向无序。因此,有人认为:对于宇宙这样一个非平衡态而言,最后达熵极大是有些道理的。然而,耗散结构理论指出,对于远离平衡态的开放系统,可以自发地发生由无序向有序的转化过程,对整个宇宙而言,即存在着从有序向无序转化的过程,即熵增过程;也存在着无序向有序转化的过程,即熵减过程。因此,认为宇宙在历史长河中只是熵在不断地增加,是没有什么根据的。

(3) 熵增原理的严格说法应该是:"一个热力学系统从一个平衡状态出发,经过绝热过程,到达另一个平衡态,它的熵不减少。"这里很重要的一点是,体系在过程的开始和过程的终了都处在平衡态。而对于宇宙来说,在我们知识所及的历史年代里,宇宙一直处于远离平衡状态之中。因此,说在我们所及的历史年代中宇宙的熵不断增加是没有根据的。

(4) "热寂论"未考虑宇宙的膨胀,随着宇宙的膨胀,辐射与粒子温度下降速度不同;即使原来温度相同的系统也会因为辐射与粒子温度下降速度不同而形成温度差,这同热力学第二定律的结论不同。另外,在宇宙系统中,引力起着重大的作用,在一定范围内,会出现弥散物质的集聚现象,宇宙中的星系很可能就是这样形成的。这是与熵增原理不同的物理过程。因此,考

虑到宇宙的膨胀及引力效应，宇宙“热寂”是不可能实现的。

至此，我们再回顾一下历史就应看到，在 19 世纪 40 年代以后，短短的十几年中，至少在四个国家，由六七种不同职业的十几位科学家，从不同侧面独立地发现了能量转换和守恒定律，这是物理学史上的第二次伟大的综合，是科学史上的一次伟大的奇迹。人们从理论上、实践上都开展了大量的研究和开发。下面我们再接着介绍有关应用的实践。

4.4 能源工程

人类在生产、生活中都和能量相关，人类的历史就是利用能量的历史。能量有许多种形式，如机械能、热能、化学能、电磁能、光能、放射能、核能等，作为利用能量的工程实际问题的了解，这里我们把常见的能源工程作一些介绍。

4.4.1 机械能间的转换工程

常见的机械能有动能、重力势能、弹性能、表面张力能等。

水力的利用中水力发电是重要的一种，它是用大坝把水拦挡起来使水在大坝内的水位提高，而在大坝下方开有通道，使水可以流过，这样，被蓄聚的水也由于落差而蓄积了重力势能，在水流往大坝下方孔穴喷出时，重力势能转化，使水流具有高速度，带有强大的动能。

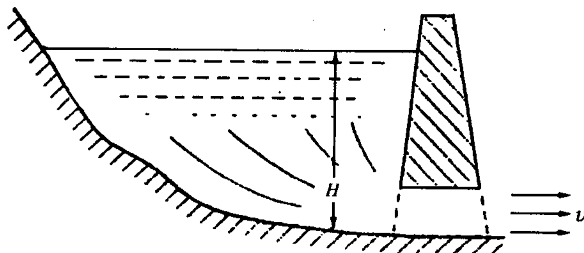


图 4.13 水力发电示意图

其变换关系式为

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2$$

若喷出的速度为 v，大坝内水面高度为 H，则可有 $v = \sqrt{2gH}$ 的关系，假定 $H = 50\text{m}$，大坝水底出水孔半径为 1m，计有三个孔，则可有，$v = 31\text{m/s}$，流量 $Q = \rho qS = 2.9 \times 10^5\ \text{kg/s}$，则功率为

$$P = W/t = \frac{1}{2}Qv^2 = 1.5 \times 10^8\text{W}$$

利用水的能量可使水轮机旋转而进行发电。和水轮机相逆的效应是水泵，是把水的动能变为水的势能，常见的水泵有图 4.14 所示的几种形式。

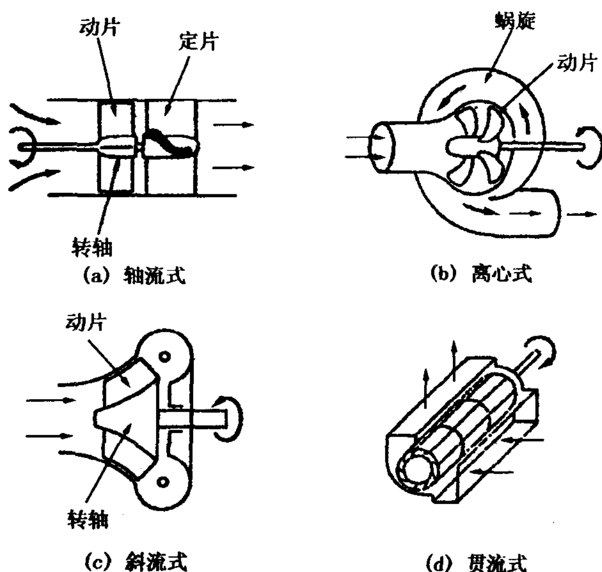


图 4.14　几种水泵

在水力发电的大坝设计中，考虑的电力的需求量在一天中变动较大，往往是白天需要多，夜间需要少，所以在大坝的下方，设计一个能容纳水的低方贮水池，白天利用大坝中的高水位水冲击水轮机发电，而夜间则利用多余的电力把低方贮水池中的

水用水泵打到大坝的高水位中去，这种发电厂也称为抽水发电厂。

这种形式的发电厂有的是把水轮机和水泵设计为同一体，白天和夜间分别具有不同功能，也有的是两者分开，各自具有不同的功能。我国台湾省有名的日月潭的水力发电就是采用的这种抽水发电的形式。

利用水的力量来发电的还有潮汐发电，潮汐发电时预先开挖一个贮水池，在涨潮时，潮水全部充满贮水池，退潮后则利用贮水池中的高水位来发电。也有做两个贮水池，一个在涨潮时贮水，一个在退潮中存水，利用二者水位差来发电的，这种发电中所用的水轮机是一种低落差形式的，如图 4.15。潮汐发电是有一定周期的，这给发电造成了一定的限制和困难，则又有一种利用海边汹涌澎湃的海波浪来发电的。如图 4.16 当波浪上升时，A 室中空气排出使空气或汽轮机运转；波浪下降时，B 室空气吸入，这样总是使汽轮机向一个方向运转，将汽轮机和发电机

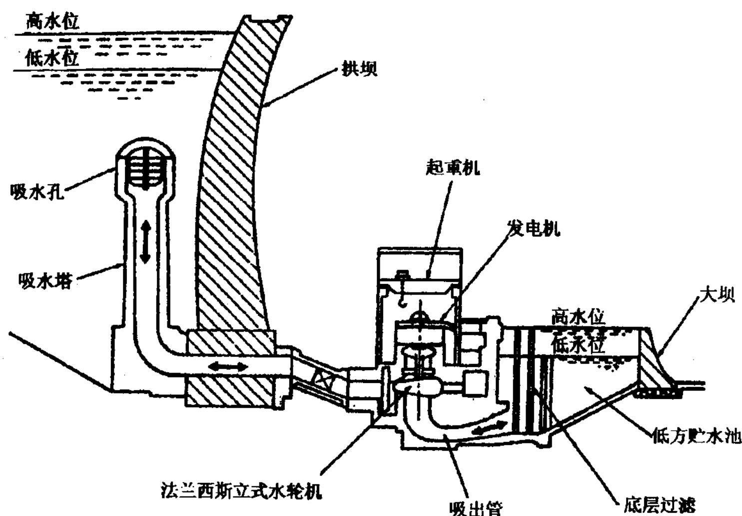


图 4.15　潮汐发电

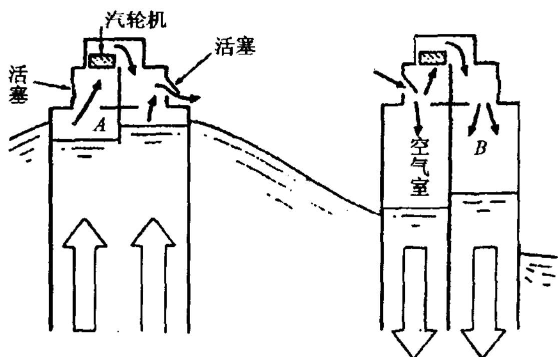


图 4.16 海波发电机

相连就可以使发电机发电了。

自然界的资源是丰富的,但在内陆地区,不可能有海,因而利用水、潮汐、波浪也就无从谈起了,但在内陆的地区和广阔无垠的大草原上,风力则是可以利用的好资源,当然沿海地区也可以利用风力来发电。由于风具有不确定性,因此在设计中,也可利用偏向装置,使风车始终能最大限度地利用风能,一般风车的输出功率为

$$P = 2.0D^2v^3(\mathrm{W})$$

D 为叶片的直径(m),v 为风速($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$),一般风车的能量转换效率都小于 60% 。以上是介绍的机械能间的转换工程的一些实例。

4.4.2 热能和机械能间的转换

由热能转换为机械能是能量转换中的一个最基本的模式(图 4.17),从产业革命以来蒸汽机的出现就在世界工业发展中起了不可磨灭的贡献,热机一般是由五大要素组成的。水、燃气是工作流体,锅炉、燃烧室、核反应堆则是加热部分,汽轮机等则是输出作功部分,冷凝器、大气则是冷却部分,输水泵、压缩机等则是加压部分,这五部分构成了热机的基本要求,常见的热机有

内燃机、蒸汽机、汽轮机等三大类型。

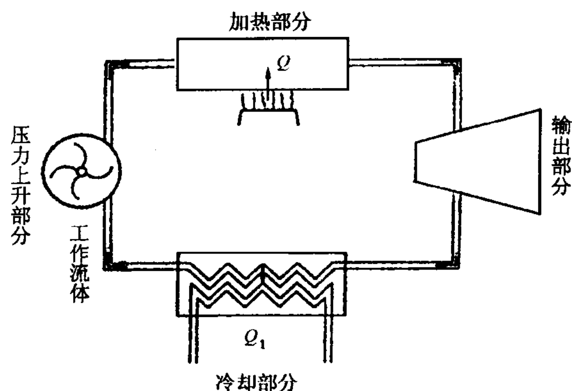


图 4.17　热机原理图

(1) 内燃机

内燃机是用汽油、轻油、柴油等石油燃料，使之在燃料室中燃烧，而产生输出功率的。因它们的热力学过程不同，其循环过程有奥托循环、狄塞尔循环两大类。

奥托循环由绝热—定容加热—绝热膨胀—定容冷却四大过程组成，其 p-V 图及 T-S 图如图 4.18 所示，其中 S 为系统熵值。

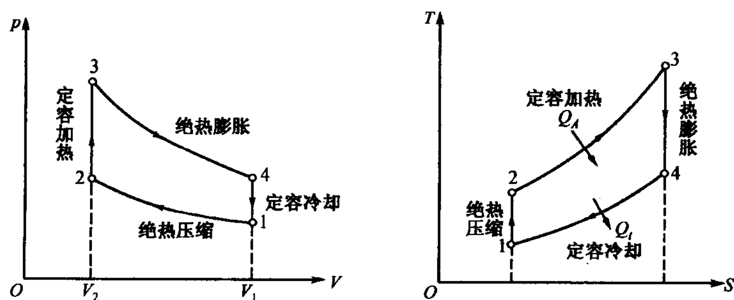


图 4.18　奥托机的示功图

奥托循环的热效率 $\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$，其中 ε 为 V_1/V_2 是压缩前后的比值，γ 为绝热比值。奥托循环分为四冲程和两冲程两种，两冲程奥托机的点火爆炸次数是四冲程的两倍，其压缩比低，润滑油消耗多，而且还要采用强制性的排气，燃料室的冷却则分水冷式和空(气)冷式两种。从汽油机排出的废气是污染环境的一大污染源之一，为了减少排出废气中 CO、HCl，采取使用催化剂并重新送入燃烧室燃烧，但 NO_x 这类化合物高温高压时产生量大，要使用催化剂使之燃烧减少则是非常困难的，现在也有用在燃烧室静置燃烧，并推迟点火时间，进行两阶段燃烧的方式来减少废气。

狄塞尔循环(图 4.19)，是在活塞中压缩行程终了时，在变成高温的空气中自己点火燃烧，它由绝热压缩一定压加热一绝热膨胀一定容冷却四个过程形成循环，其热效率

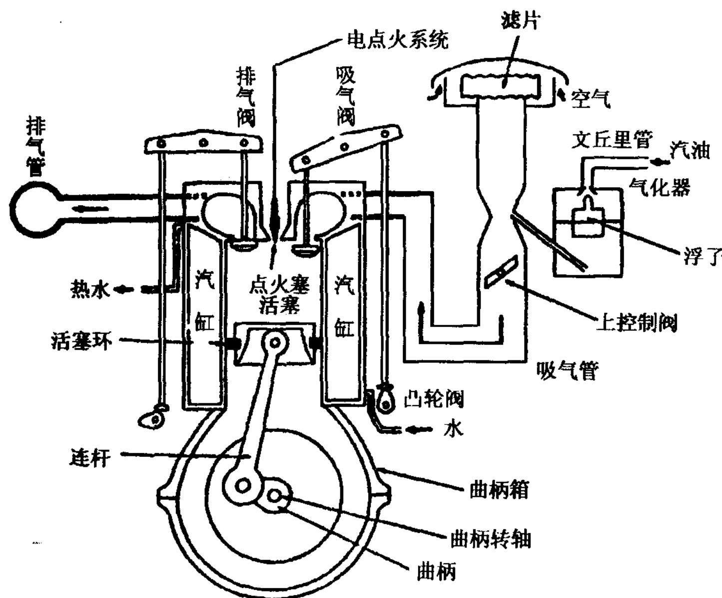


图 4.19　狄塞尔机

$\eta = 1 - \dfrac{\beta^{-1}}{\gamma(\beta - 1)} \cdot \dfrac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$，其中 β 为 V_3/V_2，ε 为压缩比，约为 15～23，其 p-V 图，T-S 图如图 4.20。狄塞尔热机较之奥托热机旋转速度低，但它的功率大，在载重汽车，大型机械中一般用得很广泛。

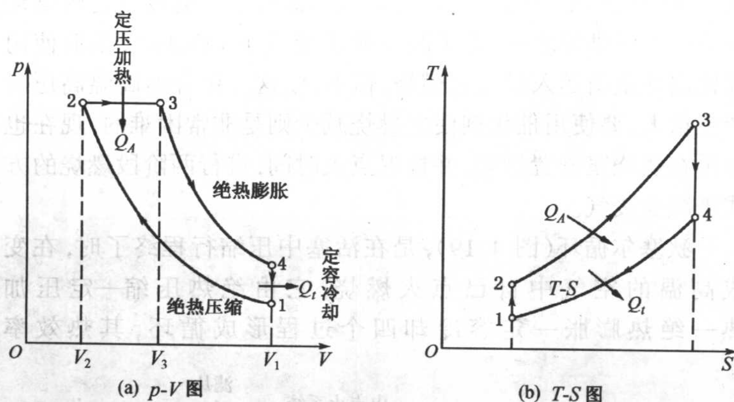
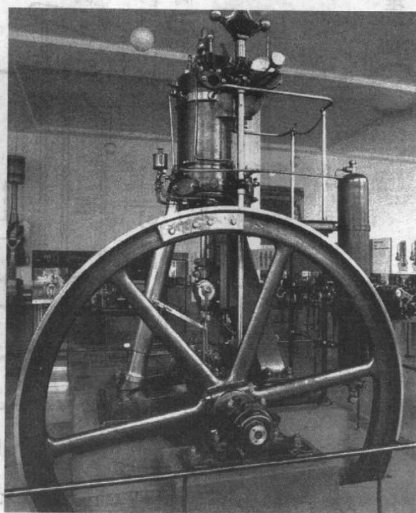


图 4.20 狄塞尔机示功图





狄塞尔和他发明的内燃机

（2）蒸汽机

在蒸汽机中，由燃烧产生的能量要通过锅炉来完成，锅炉是由燃料热能变为蒸汽的热能再推动活塞来作功的，并不是我们日常生活的加热锅，常见的有以下三种形式：贯流式，水管式，汽鼓式，如图4.21。锅炉中的水采用自然循环，强迫循环和两种循环复合的三种形式；在燃烧室中，用强迫送风方式把煤粉等燃料送入使之燃烧，燃烧室的温度常见的是1000～1400℃。

图4.22为一个用贯流式锅炉和汽轮机来发电的火力发电厂的简略布置图。

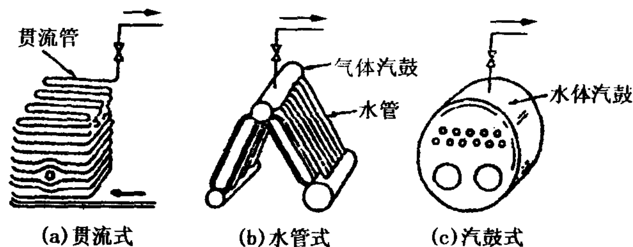


图4.21　几种常见锅炉

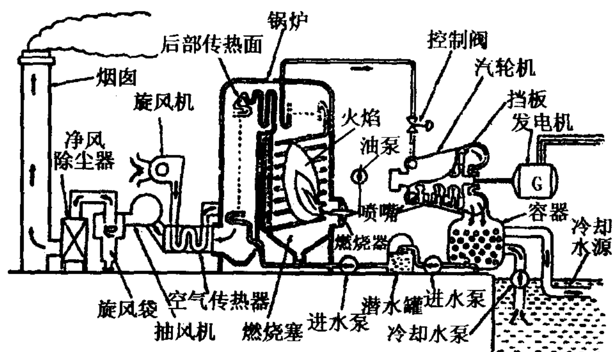


图4.22　常见的火力发电厂示意图

在从热能变为电能的过程中，目前，包括我国在内的不少国家正在研究由热能直接变为电能的磁流体发电的方式（MHD方式，见图4.23）。若高温下的一些金属离子在如图 x 方向

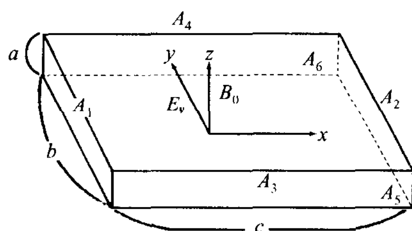


图 4.23　MHD 发电流体通路

(A_1 面 → A_2 面)流动时，在 z 方面向上施加强磁场(A_5 面 → A_6 面方向)，则在 y 方向(A_3 面 → A_4 面方向)就产生电势差，若它和外负荷 N 相连时，则可以对之作功，其功为

$$W = \frac{abc\sigma N v^2 B_0^2}{(N+1)^2}$$

其中，B_0 为外加磁场强度，v 为电导电流体运动的速度，σ 为导电流体的电导率，N 为外负荷，a，b，c 为发电区的几何尺寸。

其详细的原理在我们学完电学部分就会更加明白了，MHD 是在高温下工作的，这时气体的温度要高于 2000℃，必须要选用耐高温的炉壁材料，炉壁希望工作在低温，而对导电流体的电导率来说，低于 2000℃ 导电气体中的 Ca^{2+} 离子会使电离的正负离子复合，减少离子的浓度，降低效率。因此，在选材上这样的矛盾使 MHD 的实用化就很困难了，也有人设想用 Hg，Na，Li 等液体金属来做工作流体，这样，电导率是可以提高，但流速 v 的提高却又是个难题了，用液体金属来作为 MHD 的工作流体，在将来使用原子核的高速增殖炉和核聚变炉来直接发电中也许是有实用的可能的。

作为未来的畅想也有人想用热电子发电，即加热某物体使之发射电子，而另外又有一个收集极专门收集电子，这样形成一个热电子发电装置，还有人设想利用海洋中海水不同深度的温度差来进行发电。当然，这些设想是很好的，但要实现却不是一件容易的事。

4.4.3　化学能源的利用

把化学能源变为热能，最重要、最简单的一种方式就是燃烧，在表 4.1 中列出了几种燃料的标准燃烧热。

表 4.1 几种燃料的标准燃烧热(20℃,1 个大气压)

物质	标准燃烧热(J/mol)	物质	标准燃烧热(J/mol)
H_2(g*)	68 320	C_8H_{18}(g)	1 317 450
C(s)	97 050	CH_3OH(l)	173 600
CO(g)	67 640	C_2H_5OH(l)	326 700
CH_4(g)	337 300	CH_3COOH(l)	208 700
C_2H_6(g)	372 800	C_6H_6(l)	781 000

* g:气态;s:固态;l:液态。

现在作为重要燃料的石油是化石能源,它是由植物性的生物由于地壳的变迁被埋藏于地下而形成的。石油矿藏的地质构造如图 4.24 所示。

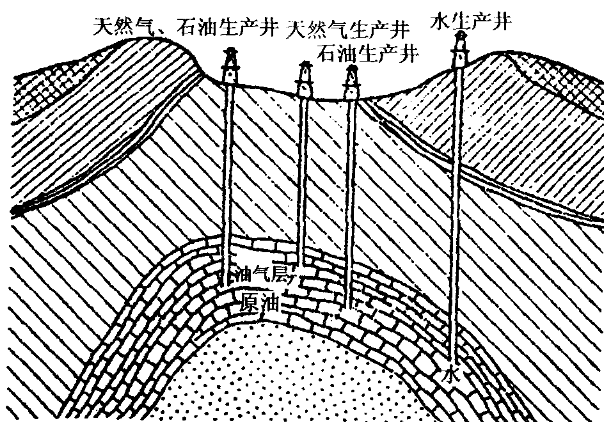
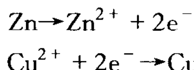


图 4.24 石油矿床的地质构造

石油在全球现已确认的埋藏量为 7.4×10^{11}桶,推算最终可以开采的埋藏量为 2×10^{12}桶,除了石油外(包括天然气),煤也是从化学资源变为热能资源的重要燃料,由于它的流通性差,杂质多,燃烧后的产物使大气污染及煤渣灰粉的处理麻烦等缺点,在二战后已逐步让位于石油了。二次大战后,曾出现过两次石油能源的危机,这样又有人在考虑是否可以再重新使用煤炭来解决石油危机的问题,其中重要的研究课题之一,就是煤炭液化的问题,它是把煤炭加氢分解,并使之可溶化,这是在高压条件下,通过加催化剂的触媒反应来进行的,常见的方法有直接加水

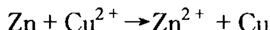
法，熔媒提取法，气化合成法等，这在不少国家都在研究中。

化学能变为电能的转化是用电池来完成的，一般作为模型的电池是在硫酸铜溶液中加入铜棒和锌棒作为两电极，由于氧化还原反应的原理，可形成电池(图 4.25)。这时电极上的反应是



$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$$
$$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$$

即



$$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu$$

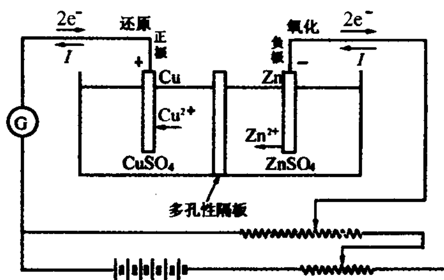
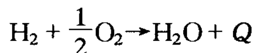


图 4.25 化学电池

作为日常生活中使用的电池，它可以担负起由化学能提供电能的作用，但若作为工业使用，要能连续提供电能，它是有困难的。这样，就有一种燃料电池可能解决这个问题，燃料电池是燃料在被氧化的过程中，连续地向外提供电能的装置，如用 H_2 作燃料时，则有下述反应：



$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + Q$$

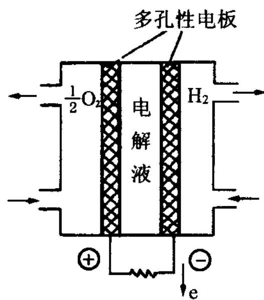
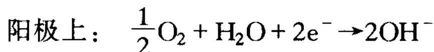


图 4.26 氢燃料电池

氢燃料电池是燃料电池中的重要的一种，其原理如图 4.26 所示。

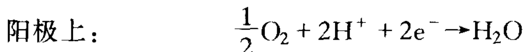


阳极上： $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$



阴极上： $H_2 + 2OH \rightarrow 2H_2O + 2e^-$

若电解液带酸性，电解液中氢离子富裕，则有下列反应：



阳极上： $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$



阴极上： $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

电池的起电力 $E = -\frac{\Delta G}{2Q_{mol}}$，其中 ΔG 为吉布斯自由能变化，Q_{mol}为 1mol 分子所具有的电荷量。其效率为

$$\eta = \frac{-\Delta G}{-\Delta H}$$

式中 ΔH 为系统熵的变化。

由于氢作为燃料电池的燃料有很多其他燃料难以相比的优点，如，它没有环境污染的问题，它的生成物是水，不像其他的化学燃料有 CO_2 大量排放，而造成地球的温室效应的问题。另外，当前使用的电力是难以贮存的，而氢则可以利用贮氢的方法使之存放较长的时间，而且这是气体，输送也不困难，这些都是氢作为新燃料的众多的优点，但是它不像石油、煤炭是一次化学能量资源，它是二次化学能量资源，它是需要耗费其他某种资源来制造出来的。现在不少科学工作者正致力于氢的制造和贮存等的研究中。可以期待完全使用氢能源的一天是会到来的。

4.4.4 电能变为其他能

电能转变为热能的变化是常见的一种，常见的变化方式有电阻式、电弧式、电磁感应式、电磁损耗式等几种，电阻式是利用被加热物体固有的电阻而产生的焦耳热，其发热量 $W = 0.24j^2r$，其中 j 为电流密度，r 为比电阻。

电弧式则是利用气体在两电极电压升高时产生电晕放电，在电压升高时电流急激增大，这里气体形成热等离子体，电子、离子和阳极、阴极相互碰撞时会产生高温，其温度一般都在 3000 K 以上，有时会达到 10 000 K，电弧炉炼钢就是利用的这个原理。

在通以高频率交变电流的线圈中，放置一个良导体，由于在导体中的交变磁场变化迅速，则会产生很高的热量，加热效果非

常显著。这种感应加热的效应使得电流在被感应物体的表面薄层 δ 的厚度中流通，这被称为趋肤效应。δ 的大小正比于 $\sqrt{r/f\mu}$，r 为电阻率，μ 为磁导率，f 为电源的频率。在常温时，一般的钢材中，当 f 为 50 Hz 时 δ 为 3 mm，当 f 为10 000 Hz时 δ 为 0.2 mm。

另外，还有一种是利用材料的介质损耗而产生热量的，在单位体积中，加热的功率为 $W=2\pi f\varepsilon E^2\tan\delta$，其中 E 为电场强度，ε 为介电常数，f 为频率，$\tan\delta$ 为介质损耗角的正切值。利用介质损耗加热一般是用于在物体体表里均一加热的情况，如木材，塑料等的干燥等方面常用此法来进行。电能变为机械能的电动机的例子，这里就不深入讨论了。

电能转变为光能的现象，在日常生活中也常见到，常见的白炽灯，就是利用物质在高温时会发光的现象，按照斯特藩-玻尔兹曼法则，物质的辐射能 S 是和绝对温度 T 的四次方成正比的，即 $S=\sigma T^4$（其中 σ 为斯特藩-玻尔兹曼常量，且 $\sigma=5.67\times10^{-8}\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}}$），其辐射强度最大的波长 λ_{max}与辐射值的绝对温度成反比，即有

$$\lambda_{max}\cdot T=b$$

这就是维恩公式。式中 $b=2.898\times10^{-3}\mathrm{m\cdot K}$。

一般的白炽灯在 2600℃ 的高温时钨丝发生的光，绝大多数是在可见光的范围中。除白炽灯外的常用的日光灯，则是利用从灯丝发出热电子在电场作用下和管中的低压汞蒸气的原子相碰撞，使 Hg 原子发生电子跃迁而发出紫外线。若日光灯内壁不涂敷荧光物质，则该灯管就是紫外灯管；若管壁涂敷有荧光物质，荧光物质受紫外线激发则产生可见光。日光灯的发光原理及线路如图 4.27 所示。

在照明系统中还有使用弧光放电的灯如水银灯、钠灯、氙灯，以及冷光灯系列，如电点火冷光灯，发光二极管等，主要的照明灯的种类及其效率等如表 4.2 给出。

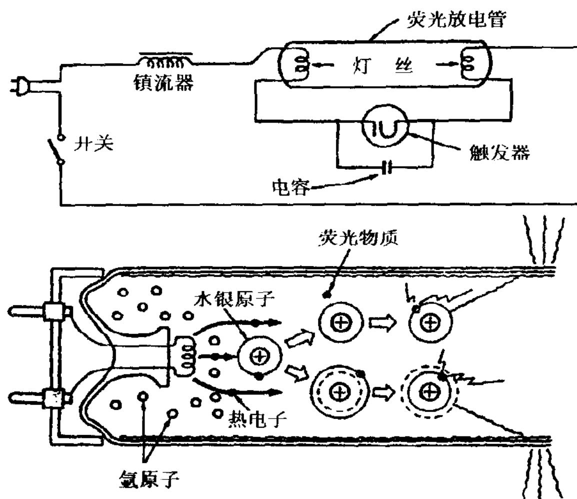


图 4.27 日光灯工作原理

表 4.2 主要照明灯的种类和效率

	电灯的种类	效率/($lm \cdot W^{-1}$)	发光特性等级
白炽灯	碳素电灯	3.3	C
	真空钨丝电灯(10W)	7.7	C
	真空钨丝电灯(40W)	10.0	B
	充气钨丝电灯(40W)	10.0	B
	充气钨丝电灯(100W)	13.0	B
放电灯	霓虹灯	10	C
	炭弧灯	16	A
	钨弧灯	–	A
	低压水银灯	14	C
	高压水银灯	35～52	B
	超高压水银灯	58	A
	钠灯	70～110	C
	氙灯	20～40	A
冷光灯	白色荧光灯(20W)	57	A
	白色荧光灯(40W)	72	A
	昼光色荧光灯(20W)	51	A
	昼光色荧光灯(40W)	63	A
	EL 灯(电点火冷光灯)	–	–
	发光二极管	0.2	–

注:发光特性等级为:A—好,B—普通,C—不太好。

值得提出的是 20 世纪 60 年代初发展起来的激光,它是原

子、分子、离子等的轨道电子处在受激状态，在外来光的诱发下，从高能量的激发态向低能量的状态跃迁时所得到的被增强了的同相位、同方向、同频率的光，这是一种单色性强，指向性强的光源。激光一词的英文 laser 是 light amplification by stimulated emission of radiation（受激发射的光放大）的字头构成的。图 4.28 是两种典型的气体激光器和固体激光器的示意图。此外，还有半导体激光器等。

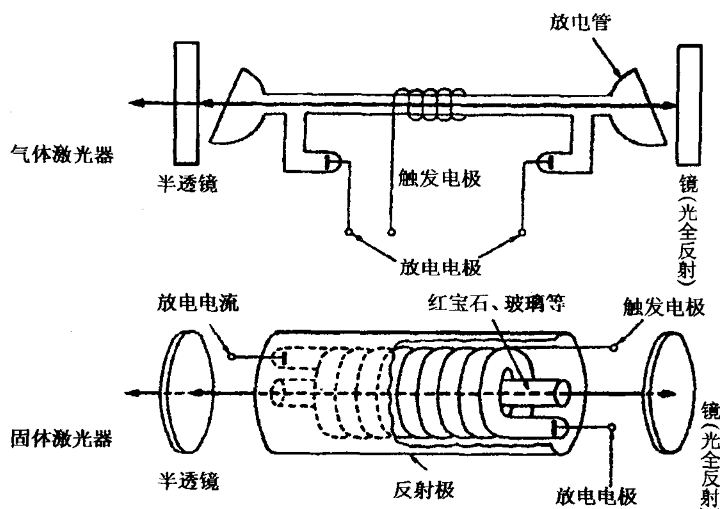


图 4.28

激光的用途很广，它在计测、医药、通信、核聚变等多个方面都获得应用，并且可望在更多的范围获得更大的应用。

4.4.5 光能变为其他能

光能转变为电能的效果，目前已经达到了商用程度，利用半导体硅制成的光电池、太阳能电池的产品到处可见，一个太阳能电池可以做到开路电压 0.5V，短路电流 25mA/cm^2，转换效率达 15%，商场销售的也可达到 10% ~12%。刚开始使用的太阳能电池都是用单晶硅制造的，这样势必带来价格昂贵的缺点。

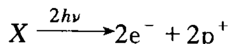
现在正转向用硅薄膜和用多晶硅来代替单晶硅。

除硅以外的半导体材料，还有人在开发 GaAs, CdTe, CdS 等。用 CdS 制成的太阳能电池开路电压已达 2.4V，它吸收比 0.25μm 更长波长的太阳光，其效率可望达到 10% 左右。

从光能变换为其他能量中，有一种叫做光电极反应，用它可以制成湿式光电池以及可以利用它进行水分解反应。所谓光电极反应是在电极-电解液系统中，当光照射时，电解液中的某种物质活性化，使电极金属等因感光而变化，电极的势垒变化，而产生电流的变化，这是一种光电化学效果。

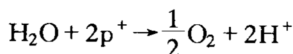
如在电解液中插入 n 型半导体作电极，n 型半导体的载流子——电子则从半导体上向电解液中移动并形成空间电荷层。若向 n 型半导体上照射较其禁带能级 E_g 更大能量的光子时，由于产生电子和空穴，新生成的载流子则受半导体和电解液间的势垒的作用而移动，电子向半导体内部迁移。空穴向表面运动，分离运动形成氧化性电流，这就表现出了光能量的效果。反之，用 p 型半导体时，则在阴极分解，产生光电极效果，并且产生还原性的电流。

在前面我们讲氢燃料时，曾谈到氢气的提取问题，而这里用半导体的光电极反应就可以使水分解而使氢、氧分离出来。其原理如下，若用 X 来表示某半导体，当光照射在它上面时，则有



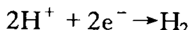
$$X \xrightarrow{2h\nu} 2e^- + 2p^+$$

半导体阳极上的反应为



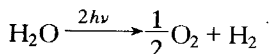
$$H_2O + 2p^+ \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+$$

金属阴极上的反应为



$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

合反应是



$$H_2O \xrightarrow{2h\nu} \frac{1}{2}O_2 + H_2$$

这样，在半导体为阳极的电极上面有氧气出来，而在金属阴

极上则有氢气排出。但是,很遗憾这个方法尚停留在实验室研究阶段,实用装置尚未制造出来。其主要的困难是光照射在半导体电极上要产生溶解现象,另外半导体的禁带宽度大,非要使用近紫外的短波长光才能激发出电子。在该实验过程中常用的阳极是n型半导体的CdS、TiO_2、$Hg_2Ta_2O_7$、$Hg_2Nb_2O_7$等,若把若丹明B(Rhodmine B)和玫瑰红等色素和ZnO、CdS、TiO_2等相组合,由于色素增感而能帮助光波的吸收,可以扩大电极的使用。这也正在研究中。

这里还要特别介绍的是利用自然界的放射线——α射线,β射线,γ射线的能量转变为电能的装置,这就是所谓的核电池,核电池有以下几种类型。

利用p-n结的核电池

对于p型,n型半导体,使之形成体接触的p-n结。用放射线代替太阳光进行照射时,就会激励起价电子,跃至导带中去,从而形成电子和正的空穴作为载流子,流通形成电流。虽选用α射线,γ射线或X射线都可激发产生载流子,但是用β射线照射时,由于β射线对半导体来说其波长最适宜,最易吸收,因而电离效果好。同时β射线的防护也容易,所以常用β射线。

从Sr发射的β射线照射在Si或Ge的p-n结处,这时在外部负载上流通有0.3V电压,7μA电流并可得到1.58×10^{-6}W的功率输出。对于Si的p-n结则可有0.47%的效率。制成的器件如图4.29所示。

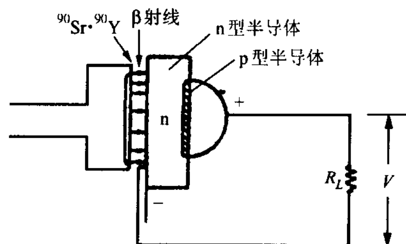


图4.29 β射线核电池

当然也可以不把β射线直接照射到半导体上去。而用β射线先激发荧光物质。再以荧光物质发出的荧光来激发半导体而产生电能，其具体装置如图4.30所示。其结构中为防止放射线的泄漏，放射源用塑料夹持着。这种核电池的效率是1%。

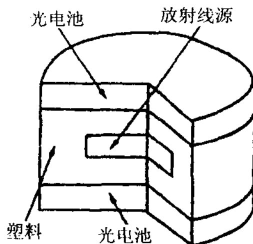


图4.30 β射线荧光核电池

用两种金属和电离气体制成的核电池

用两种功函数不同的金属（或金属氧化物）相对放置，其间放入放射性的气体（或是用γ射线照射中性气体使其电离）。这样就构成了一个核电池，对外就有功率输出。图4.31(a)所示是其原理图。若电极间为中性气体，则电极间的电位分布如图4.31(b)所示。若气体中存在有电子或离子时，电子会向功函数小的电极A移动。离子则向功函数大的电极B移动。这时的电位分布就成了图4.31(c)的情况。两电极的外电路上接有负载R，则在负载R上有电流流过。

若负电极用铝，正电极用表4.3所示的各种材料，则其可得不同的开路电压。

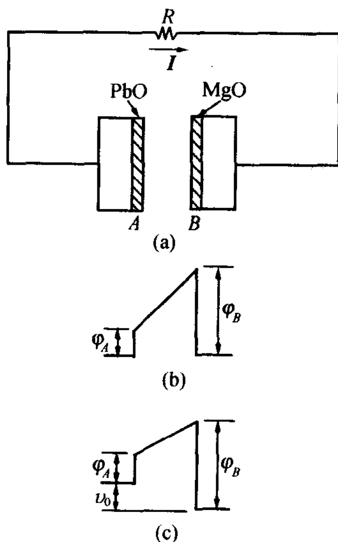


图4.31 金属氧化物核电池

表 4.3 电材料和开路电压

电材料	开路电压/V
Au 贴上 PbO	1.34
CuO_2	0.975
Cu 贴上 Au	0.95
Ag	0.67
Cu	0.64
Pb	0.2

若用 γ 射线照射，γ 射线能量为 -6.49×10^{-8} W。则这种核电池的输出功率为 7.3×10^{-12} W，效率则为 0.011%。

除了半导体材料外，对热电偶的接合部的某金属部分用放射线照射时，也有可能得到电能的输出，也即可成为核电池。对镍-康铜的热电偶用 $^{218}_{84}Po$ 来照射时，可得 9.4mW 的输出，其效率是 0.2%（图 4.32）。

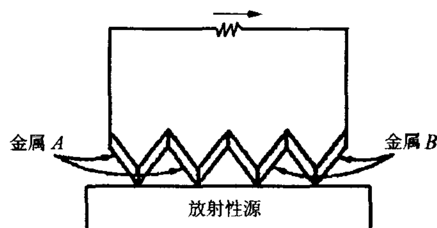


图 4.32 热电偶核电池

一般而言，核电池的效率不高，但也有效率达 20% 的。若在一个用石英管制成的发射极内放有放射线同位素镭，石英管将吸收 α 射线，而 β 射线则可通过。另一处要放有收集极，它与发射极用绝缘体或真空相隔开。这时可以得到几十万伏的电压输出。图 4.33 所示的是原理图。据报道该核电池可达 365kV，10^{-9}A，0.2mW 功率输出，效率达到 20%。

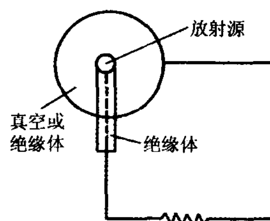


图 4.33 高效核电池

4.4.6 核能

核的放射性的发现是19世纪的事了,但是核能的利用却是20世纪开始的,许多科学家孜孜以求不断努力。核能的利用有两大形式,即核分裂和核聚变。下面分别作些介绍。

核分裂

利用核能的装置一般有以下几个部分,即核燃料部分,反应堆部分,减速和控制部分,冷却部分等。由于天然的放射性物质中含放射性物质很少,必须进行浓缩。如天然的铀矿中 $^{235}_{92}U$ 的含量只有0.7%。只有经过浓缩后该燃料方可进行使用。浓缩的方法有扩散法、离心分离法、激光浓缩法等。以铀为例,作为核燃料使用的除了浓缩的铀的纯金属外,还有它的氧化物,碳化物,以及和其他金属烧结成的合金核燃料,核燃料较一般燃料特殊,必须存放于精制的容器中。同时外层还需加以防护、包裹以防放射线泄漏。图4.34是装置核燃料的容器。

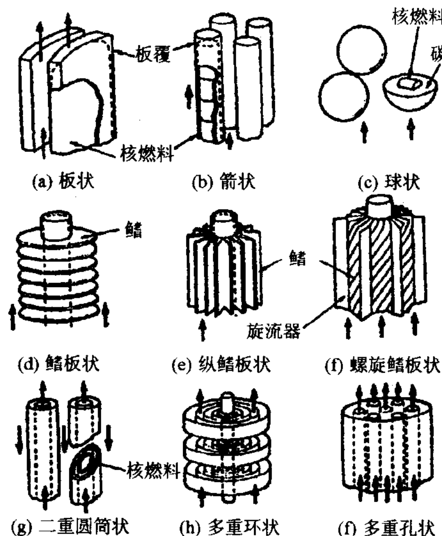


图4.34 核燃料容器

反应堆是核反应产生的装置，并且是从中取出热能的地方，具体的装置的原理图如图4.35所示。核燃料用不锈钢、锆等材料包裹着，它作为炉心，周围是水、重水。碳、有机液体作为中子减速剂，这可以控制核反应的速度。核反应的热量用冷却材料循环将其取走，以供利用。这种反应堆叫做热中子反应堆。在利用原子能方面，对于核发电、船舶用以及其他用途则分别使用加压水型炉、沸腾水型炉、气体冷却炉、重水减速炉等形式。这里列举了几个原理图(图4.36～4.39)。

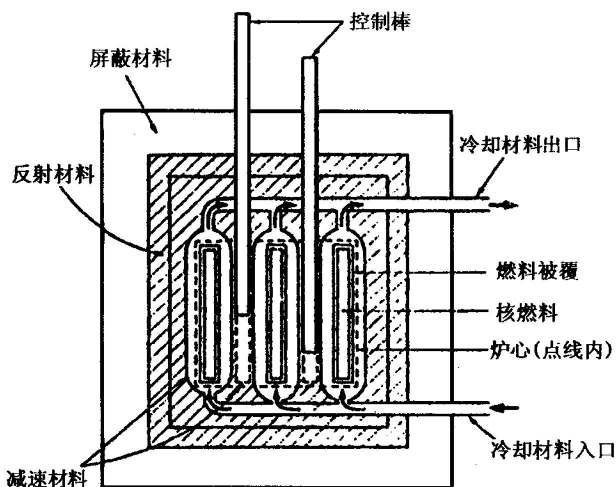


图4.35 核反应堆原理图

核聚变

核分裂是重金属经过放射后衰变为较其本身轻的金属，同时辐射放射线。而若将轻核聚合形成较重的元素，其产生的能量比核分裂反应还要大，但是它需要一定的条件。如要在高温下，且使轻核具有高能量的情况下才行。如著名的托卡马克装置就是让轻核在磁场作用下加速而聚变的(图4.40)。

回旋磁场可以是闭合的，也可以是开放的。这里列举两个核聚变炉的原理图供读者们参考(图4.41，图4.42)。

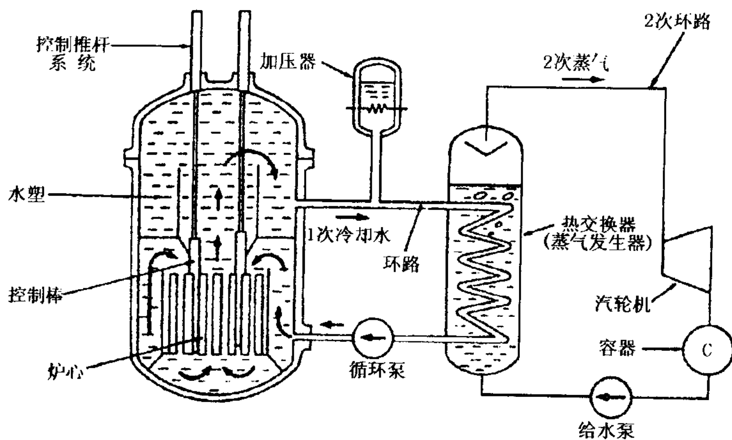


图 4.36 加压水型炉

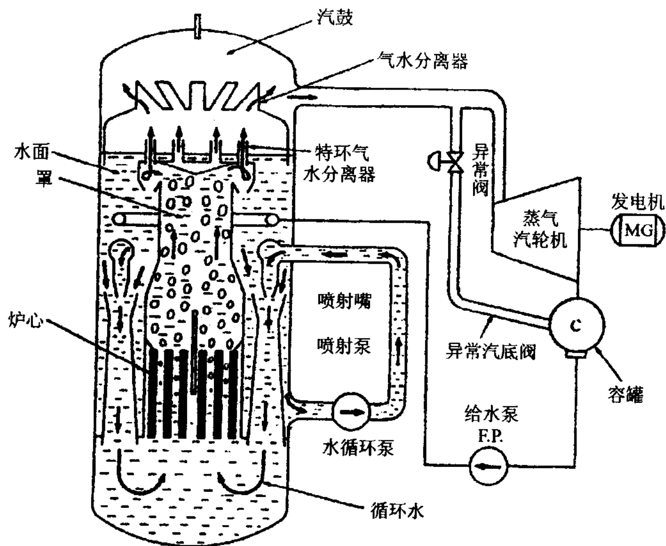


图 4.37 沸腾水型炉

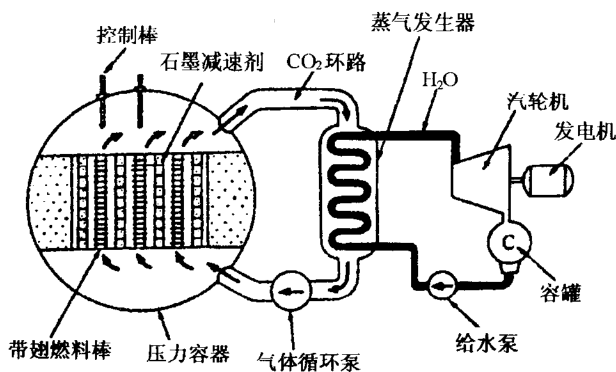


图 4.38 气体冷却炉

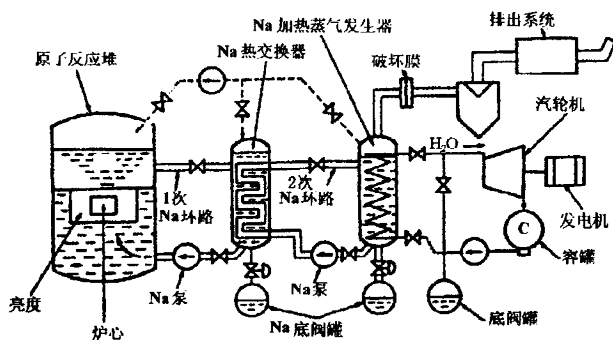


图 4.39 冷却高速增殖炉

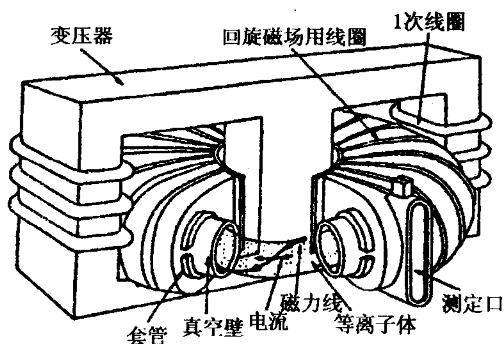


图 4.40 托卡马克装置

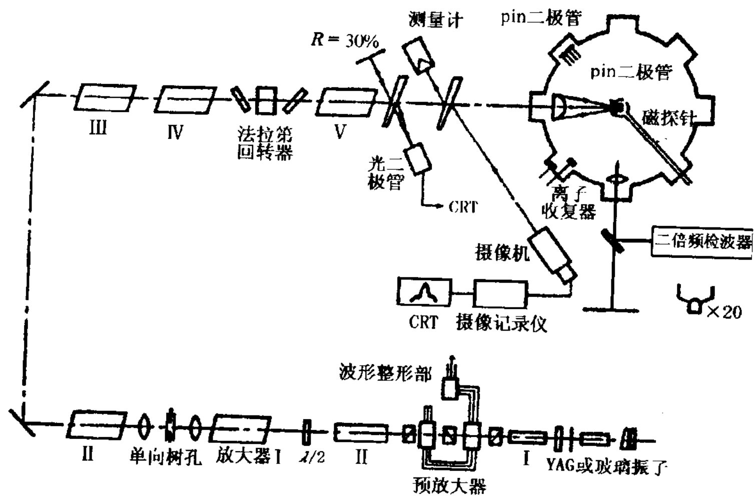


图 4.41　激光核融合实验装置

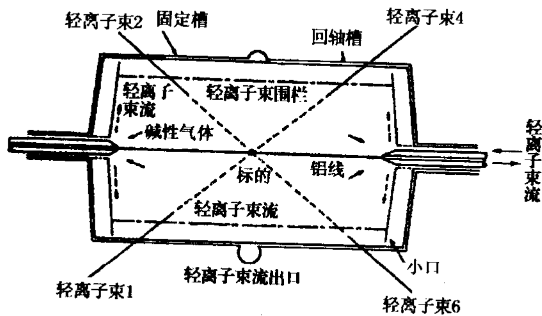


图 4.42　轻离子束(LIB)核融合炉

第五讲　自然界的秩序和方向性

前一讲我们介绍了热力学的几个定律,其中热力学第二定律的表达方式非常特殊,绝大多数的自然科学定律都是用肯定的方式表达的,而热力学第二定律却相反,它是用否定的判断方式来叙述的,无论是开尔文的表达方式,或者是克劳修斯的表达方式,它们都是讲了“不可能”的问题,若再扩展一些来讨论,又有“在相同的高、低热源间工作的一切不可逆热机,其效率不可能大于可逆热机(卡诺机)的效率”,以及“永动机不可能被制造出来”等其他一些“不可能”的问题,这些问题的实质究竟是什么问题呢?这些“不可能”的背后隐含的规律究竟用什么来定量描述呢?这是人们总想了解的问题。

5.1　可逆与不可逆

在前一讲我们介绍热力学过程方向性问题时,介绍了可逆过程和不可逆过程的概念,但当人们把研究的目光,再放开一些观察存在于自然界的种种现象时就会发现,自然界有不少现象表现出过去发生的事是不可能重现的。中国有句成语叫做“覆水难收”,说的是《汉书》记载的一个人物的故事:朱买臣年轻时落魄,其夫人不愿与之患难相守,离朱而去,待等朱功成名就,衣锦还乡时,又想破镜重圆,朱则在马前泼水,以倒在地上之水无法收回(地上的水不可能再自动回到水盆中去)来比喻过去发生过的事实不可能再重现。再如一只玻璃杯置于桌上,不小心被碰倒而摔碎,这一过程的逆过程则是地上的碎片自动聚集在一起拼成一个完整的杯子,再从地上自动上升再回到桌上原来的位置。

也许我们在电视、电影中可以看到这个可逆的过程,那是由

于摄像机倒放，但这种摄像机倒放的可逆过程在真实世界中是绝对不可能发生的。另外，除在自然界中像上述现象所表明的是时间上的方向性外，还有记忆上的方向性、宇宙学上的方向性等，而可逆与不可逆实际上就是这种自然界方向性的一种体现，科学家已经证明热力学第二定律的方向性与记忆的方向性，宇宙演化的方向性是一致的，可以用它来定义时间的方向性。覆水难收，破杯不能自圆，我们可以作这样一个解释：因为马前泼出的水和杯子从桌子上碰落下来一样都是一个熵增大的过程，一盆水泼出去和整个杯子摔成碎片其熵增大了；另外与地面碰撞发热熵也增大了，……而其逆过程则是熵减少，从热力学第二定律可知，熵减少的逆过程是不能自动实现的。

从第四讲来看，尽管熵增加定律最概括地表明了热力学过程的方向性，但由于熵概念本身的抽象，使它所表达的定律对广大读者来说仍难以理解。因此，如果我们只是停留在热力学唯象层次上，确实不易了解熵的本质，了解其物理意义，用熵增加来表达热力学第二定律，只能是“知其然，而不知其所以然”。直到L.玻尔兹曼提出熵的统计解释后才得以解决。

5.2　熵的微观讨论及推广

熵的问题虽是一个抽象的物理概念，但它又是一个很重要的问题，它是从热力学中引入的一个宏观量，却存在着重要的微观意义，现在它又超越了物理领域，不仅在自然科学领域，而且在一些社会科学领域中都起着重要的作用。

能量的问题从更普遍、更重要的意义上讲是“熵”的问题。本书的前讲内容中已经叙述了热力学第二定律，在能量工程中自然界的发生过程都是受到热力学的几个定律所制约的，在前面的讨论中我们又定义了“熵”，现在的问题是，所有的物质都是由分子、原子所组成的，而它们又都是以一定规律在运动着的，这样宏观的物理量必然是和微观的物理量、物理规律相联系的。例如，热能是一个宏观量，若从微观角度来看，它是用构成宏观

物质的粒子的不规则运动的平均动能来描述的。因此，引进“熵”这个物理量也应有其微观的物理内涵。

现在，我们从微观的角度讨论一下“熵”。若有一个体积为 V 的封闭的绝热系统，系统由 N 个粒子组成，系统的能量为 E，全部的能量则是分给这 N 个粒子，现在我们看一看，这种分配有几种分法。粒子有很多状态，当粒子处于 i 状态时，此时它的能量为 ε_i，若处于该状态的粒子数为 N_i，则有

$$N = \sum_i N_i$$

$$E = \sum_i \varepsilon_i N_i$$

设把 N 个粒子中有 N_i 个 ε_i 的能量的微观状态数用 $W\{N_i\}$来表示。现举一个更容易理解的例子来说明，有 a、b、c 三个人$\left(对应于粒子数 N = \sum_i N_i = 3\right)$分三个苹果$\left(对应于 E = \sum_i N_i\varepsilon_i = 3\right)$，若一个人一个苹果也没有得到时，则相应于 $\varepsilon_1 = 0$ 的状态；得到一个苹果时为$\varepsilon_2 = 1$；得到 2 个苹果时$\varepsilon_3 = 2$；得到 3 个苹果 $\varepsilon_4 = 3$。

其分配结果如表 5.1 所示：

表 5.1 微观的状态

$N=\sum_i N_i=3$ $E=\sum_i \varepsilon_i N_i=3$	$\varepsilon_1=0$	$\varepsilon_2=1$	$\varepsilon_3=2$	$\varepsilon_4=3$	$\{N_i\}$	$W\{N_i\}$
微观状态 1		a, b, c			$N_1=0$ $N_2=3$ $N_3=0$ $N_4=0$	1
微观状态 2	a, b			c	$N_1=2$ $N_2=0$ $N_3=0$ $N_4=1$	3
	a, c			b		
	b, c			a		
微观状态 3	a	b	c		$N_1=1$ $N_2=1$ $N_3=1$ $N_4=0$	6
	a	c	b			
	b	a	c			
	b	c	a			
	c	a	b			
	c	b	a			

首先三个人各得一个苹果时，$\varepsilon_2=1$，$N_2=3$（这时 $N_1=0$，$N_3=0$，$N_4=0$），这样的分配方案只有惟一的一个，即：

$$W\{N_1=0, N_2=3, N_3=0, N_4=0\}=1$$

再次，若某个人独占，这时 $\varepsilon_4=3$，$N_4=1$（$N_1=2$，$N_2=0$，$N_3=0$），这样分配方案可能有三个。即这样分配方案为

$$W\{N_1=2,\quad N_2=0,\quad N_3=0,\quad N_4=1\}=3$$

若只有一个人没有拿到苹果，则$\{\varepsilon_1=0, N_1=1, \varepsilon_2=1, N_2=1, \varepsilon_2=2, N_3=1\}$，这种方案有 6 个，即

$$W\{N_1=1,\quad N_2=1,\quad N_3=1,\quad N_4=0\}=6$$

在这个例子中微观状态数为 10 个。这里马上可以想像出，这种统计的前提是"对于一个宏观状态，其微观状态是等几率地出现的。"人类世界中，是"一人独占"还是"平均分配"这种宏观状态应受自然规律的制约，不是由某个人的意志所左右的，自然界中最可能实现的状态就是几率最大的微态状态了。

在前面，我们曾讲过，绝热、封闭系统的熵，由于它是通过变化而增加的，熵到达最大时，则系统就处于平衡状态了。从另一个角度来看，从微观上来分析时，一个微观状态的 $W\{N_i\}$ 为最大，其可能实现的几率也就是最大，该状态就是平衡状态。由此，熵 S 和微观状态数之间就存在着一个非常重要的相关关系，熵也是一个表示数量大小的变数。若有两个部分系统，其熵分别为 S_1，S_2，若其变为一个全部系统时，则全部系统的熵为 S，则 $S=S_1+S_2$；与之相对应，两部分系统的微观状态数为 $W_1\{N_i\}$和 $W_2\{N_i\}$则全部系统的对应微观状态关系为其二者的乘积，即 $W_1\{N_i\}\cdot W_2\{N_i\}$。这里若把微观量也写成与熵大小有关的量，则应取其对数：

$$S=k\ln W\{N_i\}$$

式中，S 就是熵的微观定义量，其中 k 为玻尔兹曼常数，且有 $k=1.3807\times10^{-23}\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$。熵用微观状态数的关系来定义后，就能把熵的概念推广，而且用微观的方法讨论也非常方便。

前面的例题中，苹果以 2 个、1 个、0 个的方案分配，其分配状

态最大时,这个状态就是熵最大的平衡状态;而平均都是1个的情况,是熵低的情况,则不可能实现。该例中,人和苹果数是非常少的,而自然现象中构成系统的粒子数是很大的。例如:0℃,1个大气压的标准状态下1 m^3 气体的单位体积中有 2.69×10^{25} 个分子。混有氘、氚(氢的同位素)的冰在1个大气压下其分子数密度为 4.5×10^{28} 个$/m^3$。因此,系统的分子数是相当大的。

微观状态 i 的粒子数为 N_i,在全部粒子数很多时,平衡状态为麦克斯韦-玻尔兹曼分布状态:

$$N_i=\exp\left[-\frac{1}{kT}(\mu+\varepsilon_i)\right]$$

式中 T 为温度,μ 为每一个粒子的平均化学势,在平衡状态下,粒子多数聚集在能级低的状态中(ε_i 小的数值),而高能级的状态则是非常少。

在人类社会中,一个国家中的人口数约在 10^7 数量级,全世界则要有 10^9 的量级,和自然界现象中的粒子数 N 相比要小得多,但也是可以作为统计的大数了。由于人类社会是有意志的开放系统,若从微观考察出发,用统计力学来看时,少数的极富有者是由多数的贫穷者支撑着的,在贵族社会、封建社会也出现极少数人掌权的社会形态,若是从热力学第二定律中的熵要趋向极大值方向发展来看时,这是不稳定的,而要稳定则就要产生容易出现的贫富平衡状态来。

从生物界整体来看,可以推测到似乎也应该出现上式所示的状态,ε_i 高的状态若和高等动物如人类等相对应时,在自然界中,在大多数各种低级动物存在的基础上,有着一定的平衡,在进化过程中作为个体其熵是减少的,然而从全系统来看,在微观状态上的能量水平来说,加进了一个更高更新的水平的熵,i 微观状态增加后,系统全体的熵值作为混合以后的熵其总值是增加了。由此也可知,生物的进化,高等动物的出现,即使是从热力学、统计力学的立场来看,也不是不可思议的了。

绝热、封闭的系统中,熵增加而平衡,达到平衡状态就有一

定的平衡分布(出现贫富不均和集权阶层),失去状态的流动性。人类社会中从高温热源吸取热量而向低温的宇宙空间放出废热,则这也相当于从高温热源取得了负熵,实际上人类社会是一个开放系统,除热量以外还与周围有物质的交换。因此,不可能仅以绝热、封闭的系统来考虑和讨论问题。

今天,在社会科学的众多领域中,都广泛地涉及了熵的概念及其应用。如系统科学、经济学、哲学、文学、艺术及历史学、宗教学等门类众多的学科中,都不同程度地引进了熵的概念,运用熵的基本思想和基本方法来研究本学科的基本问题,并获得了新的启示和新的进展。

美国经济学家鲍尔丁(K. Boulding)认为,生产是进化,是以形成高熵"废物"为代价而生产出高度有序的低熵产品。消费意味有着向无序退化,是增熵过程。矿石成为钢铁,小麦成为面包,当然更趋有序,而机器变为废铁、食品变为粪便,无疑是在增熵。日本学者藤田佑幸也发表了类似的观点。他举例说,炼铁这样一个生产过程,若从熵理论的观点来看,则是把含有铁矿石物质中的熵,转移到了低熵资源的焦炭和高温物中去,其结果是制造出低熵状态的纯铁,以及作为高熵的废铁、废气和矿渣等,作为整体的熵仍是增大。由此,他得出结论说:"熵理论所表示的,是任何生产过程也都必然地产生废弃物和废热的过程。在生态系统中,在不考虑到对这样一些废弃物的处置和处理的情况下,要从地球上除去这些污染物是不可能的。"

目前在经济领域中,熵理论主要应用在探讨环境和资源诸问题。在这方面,美国当今颇有影响的著作家、社会活动家杰里米·里夫金在《熵:一种新的世界观》一书中,已经把熵概念作了淋漓尽致的发挥。他指出:"熵定律也告诉我们,每当我们加快人或机械劳动的能量消耗速度时,熵的减少或产品价值的提高便会在整个环境中的其他地方引起更严重的混乱。因此,只要生产率按照单位产量速度来量度,将资源转化成经济效用的过程就要耗费掉不必要多的能量,而这种增加了的能量流通势必

将引起更大的混乱，或者引起熵的增大。最后，社会得为此付出代价。”在里夫金看来，经济活动不过是人类对生态循环的干预而已，它靠吸收环境的低熵而排出高熵。所以如果人类社会以高于自然本身转化的速度把摄取的低熵物质能量转化成效用和高熵的废物，那么整个生态的熵赤字就会上升。因此，里夫金要人们正视这样一个观念：“我们利用部分可行的物质能量贮存的行为本身有着双重含义：首先，个人、组织、社团或社会最终将要以种种形式为产品生产引起的混乱付出代价，这个代价要比产品的使用价值大得多；其次，可供未来人类和动物受用的能量已经减少了。”

热力学定律曾被较早地移植到宗教领域。19 世纪的许多科学家，包括焦耳、迈耶、开尔文等人都有关于热力学的宗教陈述。另一方面，也有许多牧师对宗教作过热力学解释。热力学第二定律最初在很大程度上是被利用来证明上帝的存在，熵增加的假设也曾被利用来反对过进化论。

通过以上简要的列举和介绍，即可看出，熵的基本思想和基本概念确实已广泛地渗透到社会科学领域，尽管有些运用得不是那么贴切，甚至有的是误解和滥用，但总的来说已经显示了熵的巨大冲击力，它已影响到人类生活的各个方面了，就像牛顿力学的巨大成功使力的概念无处不在，当然其中也不乏有许多是泛化了的“力”，广义的“力”的概念。

而这种泛化了的“力”当然也谈不上受牛顿方程所约束，但由于这些概念在社会科学中却可以以隐喻、类比、泛化、广义化等来引入，因而使社会科学的各个领域得到了新的启示和发展。同样，熵理论的节节胜利，使熵的概念已经波及到离最初孕育它的物理学之外很远的领域了，正由于如此，也使得熵概念远远超出了作为一种具体科学的含义，也超出了从狭义理解的作为系统演化的判据而赋有认识论和方法论的意义。美国的斯坦就曾认为，熵定律是所有科学定律中的第一定律；爱丁顿将熵定律称为整个宇宙中至高无上的哲学定律，这些都是从认识论、方法论

上理解熵的好例证。

5.3 耗散结构理论

正如前面所述，当科学家研究大量微小粒子组成的宏观系统时，发现系统的演化具有一定的方向性，深究其原因，这是因为从微观态的等几率原理，推演出对整个平衡态系统的描述而得出的结论。但到了20世纪70年代，非平衡系统的理论建立和发展起来后，使我们对自然界中的秩序问题，方向性问题又有了进一步的较全面、较深刻的认识。

1964年，比利时籍俄国科学家普里高津提出了耗散结构理论，它主要研究在远离平衡态的热力学系统中的热运动的特点和规律，这对经典热力学及其统计理论是一种补充和发展。这里，我们作一些简单介绍。

5.3.1 耗散结构理论

耗散结构

耗散结构概念是对应于平衡结构的概念而提出来的。



普里高津(1917—2003)
比籍俄罗斯物理学家

长期以来，人们研究的主要对象是平衡系统的有序稳定结构，例如晶体、液体等平衡结构。这些系统在温度比较低的条件下，组成它们的分子呈有序排列，保持着一种稳定的结构。系统内部的热运动只能使分子在平衡位置附近振动，而不能破坏系统整体的有序状态。只有在温度不断增加，达到一特定的值

之后,原有的有序稳定状态才会破坏,产生相变。例如晶体变成液体,再变成气体,整个系统有可能由平衡的稳定有序结构状态变为不稳定的无序的混乱状态。

在人们的想像中,一般总认为倘若系统原先是处于一种混乱无序的非平衡状态中,是不可能在非平衡状态下呈现出一种稳定有序的结构的。但普里高津等人对此进行了多年的研究后提出:一个远离平衡的开放系统(包括物理的、化学的、生物的、甚至社会的)在外界条件变化达到某一特定值时,系统通过不断地与外界交换能量和物质,就有可能从原来的无序状态转变为一种时间、空间或功能的有序状态,这种非平衡状态下的新有序结构,就称之为耗散结构。这种耗散结构与平衡结构不同:稳定有序的平衡结构是一种"死"的结构,它不需要靠外界供应物质和能量来维持;而稳定有序的耗散结构则是一种"活"的结构;它必须不断地与外界发生物质和能量的交换,才能维持它的有序状态,它正是通过这种有序的状态去耗散物质和能量的,因此叫耗散结构。

客观现象中有许多耗散结构的生动事例:

(1) 贝纳德对流现象中的液体系统

对于一杯给定的液体,当从杯下面给液体加热时,液体会产生一个温度梯度,液体下端温度为 T_1,液体表面温度为 T_2,液体不断地从下面吸收热量,又不断从表面向外放出热量,形成一个非孤立系统。当 $T_1-T_2=\Delta T$ 小于某一特征值时,热量通过传导方式输送,液体从宏观上看是静止的。当 ΔT 超过某一特征值时,液体内出现无数个有序的对流元胞,在对流元胞的中心,液体向上流动,在元胞的边缘,液体向下流动,形成所谓贝纳德花样。此时,热量输送主要依靠这种宏观的对流。在这种贝纳德对流现象中,液体处于远离非平衡态的有序结构状态,是一种耗散结构。

(2) 激光振荡系统

例如,考虑一个气体激光器,当外界抽运输送给原子系统的

能量没有达到一定的临界值时，每一个活性原子都独立地无规则地发射光子，光子的频率、相位都是无序的，整个光场系统处于无序状态。当抽运能量增加到某一临界值时，产生激光振荡，光子的频率与相位也都由无序变成有序，光场系统处于非平衡的有序状态，成为一种耗散结构。

(3) 生命系统

生命系统是由蛋白质、核酸等生物高分子，通过各种信息的联系与调节过程而形成的一种有高度组织的有序结构。这种有序结构处于远离平衡状态，一时一刻也不能与外界孤立起来，必须依赖不断的与外界进行生物和能量的变换，来保持这种有序的非平衡状态。如果它一旦由有序变成无序，由非平衡态变成平衡态，生命系统就被破坏而意味着死亡。所以说，生命系统是一种耗散结构。

5.3.2 耗散结构中熵的变化问题

我们知道，在经典热力学中，一个系统的熵 S 可以写成

$$S = k\ln W$$

W 代表这个系统所包含的微观状态的数目，微观状态的数目愈多，表示这个系统无序的程度越高。所以，熵这个概念可以作为系统有序程度大小的量度。熵增对应着无序程度的增大，熵减对应着无序程度的减少。

对于一个孤立系统，非平衡态总是自发地趋于平衡态，随着熵的增加，有序状态逐步变为无序状态，然而对于从无序转变为有序的问题，并没有研究。耗散结构理论则注意到了这个问题。

耗散结构理论指出：对于一个与外界有物质和能量交换的开放系统来说，熵的变化可以分为两部分：一部分是系统本身由于不可逆过程引起的熵增加(d_iS)，这一项永远是正的；另一部分是系统与外界交换物质和能量引起的熵流(d_eS)，这一项可正、可负。整个系统的熵变化 dS，就可以写作两项之和(如图5.1)：

$$dS = d_eS(\text{熵流}) + d_iS(\text{熵增加})$$

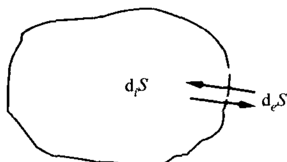


图 5.1　系统熵变化图

根据热力学第二定律可知，系统的熵增加 $d_iS \geqslant 0$。在孤立系统中，因为没有熵流，$d_eS = 0$；在开放系统中，熵流 d_eS 可以大于或小于零。如果 d_eS 为负值，其绝对值又大于 d_iS，则

$$dS = d_eS + d_iS < 0$$

这时总熵可以逐步减小，使系统由无序趋向新的有序。形成有序之后，如果

$$d_iS = -d_eS$$

即

$$dS = d_iS + d_eS = 0$$

此时，系统的熵不变，则系统可维持在非平衡的有序结构状态。

5.3.3　耗散结构形成的条件

上面谈到，一个远离平衡的开放系统，有可能从外界吸收负熵流，增加系统的有序状态，即发生一种"自组织"过程。现在要问：具备什么条件，远离平衡状态的开放系统会产生这种"自组织"过程呢？对于这个问题，普里高津认为：首先，系统要包含非线性因素，例如：化学反应总是由粒子间的碰撞引起的，因此它的基本规律永远是非线性的。如果再满足一引进条件，如催化反应，反馈条件等，则非线性的化学过程有可能导致耗散结构。"化学钟"(随时间振荡的化学反应)是一个例子。其次，远离平衡状态系统存在非线性反常涨落，是形成耗散结构的第二种情况。

我们知道，在近平衡态，即线性平衡区，涨落是一种破坏稳定性的干扰，它使系统离开平衡态。但是在这个区域，系统具有抗干扰的能力，涨落造成的偏离态不断衰减，直到消失，最后回归到稳定状态。然而在远离平衡态的非线性区，涨落则起着相反

的作用。此时系统处于一种不稳定状态,随机的小涨落通过相干效应形成一个整体的宏观的“巨涨落”,它可以使系统由不稳定的状态通过涨落跃迁到一个新的稳定的有序状态。

5.3.4 耗散结构理论的一般意义

物理学的规律对于时间来说通常都是对称的,即在 $t \to -t$ 时,物理学方程是不变的。但热力学第二定律却打破了这种对称性,第一次把时间箭头引入了物理学。

以前,人们关于事物发展过程存在着两种截然不同的理论。热力学理论指出:一切物理过程均由有序走向无序;而进化论则指出:一切生物过程均由无序走向有序。这两类过程的时间方向似乎是完全对立的,因此,物理过程与生物过程也就难以找到它们的统一性。

耗散结构理论的重大意义在于:它指出了热力学第二定律所规定的时间箭头,仅仅适用于平衡态附近的自然现象;而对于远离平衡态的自然现象(包括物理、化学、生物现象),它不服从热力学第二定律,而是可能从无序走向有序,这就把物理、化学、生物过程的时间特性统一起来了。

除了耗散结构理论外,协同学也是一种研究系统演化的学说,协同学不同意耗散结构理论关于非平衡是有序之源的观点,而主张从非平衡态出发,既可能从无序走向有序,也可能从有序走向无序,主要取决于“一定的条件”。

5.3.5 时间箭头的讨论

有人把时间箭头问题,称为是20世纪所遗留下来的四大物理难题之一。前面我们讲到过自然界的时间是不可逆转的。热力学第二定律规定了一切自然发生的宏观热现象都是不可逆的。生物学中,时间除了要描述变化,还要描述进化。而“大爆炸”理论认为,整个宇宙也是一个演化过程的产物,是在有限的过去的某一时刻从极度稠密、混沌一片的状态中产生,并且在不

断地膨胀……

对于自然界的大量现象,时间具有明显的方向性,从过去通过现在指向未来,它不具有反演对称性。即:不可以用 $-t$ 代替 t 来描述这些现象。然而,物理学的许多定律、定理具有时间反演对称。例如,牛顿力学定律、麦克斯韦电磁方程组、量子力学中的薛定谔方程等。在这些方程中,以 $-t$ 代替 t 同样满足方程。

只要给定某一时刻行星的位置和速度,通过牛顿定律就可以计算出它在所有过去($-t$)和未来(t)时刻的位置和速度;电磁波的传播满足麦克斯韦方程,也可以有两种解:推迟解和超前解。前者对应于 t,后者对应于 $-t$。但是,根据我们的经验,我们应该从这些可逆方程中选择对应于 t 的解。行星是从前一时刻的位置运动到后一时刻的位置,而不是相反;麦克斯韦方程只能选择推迟解,因为我们不可能在电台发射信号之前就接收到信号。那么,我们为什么必须采取这样的选择呢?

一些物理学家认为,自然界中的规律和约束条件(如初始条件、边界条件、对称条件等)是相互独立的。很显然,我们认为不同的行星系统,以至星系,是根据相同的自然规律和不同的初始条件开始演化的。因此,人们从这些约束条件中去寻找时间不对称的根据。

只有当普适的定律确定了初始条件、边界条件,才可能得到惟一确定的解。即,定律决定什么是可能发生的,而约束条件则决定什么是实际发生和对我们来说是有意义的。

有人根据“大爆炸”宇宙说,认为宇宙中最根本的方程是可逆引力场方程,若加上“大爆炸”的初始条件,可得到符合我们今天观测的宇宙膨胀解。而这种宇宙膨胀定义了全部宇宙的时间箭头,而其他一切时间箭头,诸如,热力学时间箭头、电磁学时间箭头、量子力学时间箭头,以及生物学时间箭头等等,均可由宇宙学时间箭头导出。

我们的定律是根据经验得来的。目前经验告诉我们,时间

箭头是从过去指向未来，定律只可选择 t 解。但是，我们并不可轻率地抛弃 $-t$ 解。没有认识的事物，不等于不存在。在狄拉克预言正电子之前，人们并不知道自然界还存在一类反粒子。同样，在我们没有理解 $-t$ 解的物理意义之前，并不意味着 $-t$ 解没有物理意义。

爱因斯坦的相对论认定自然界中光速为极限速度。但是近年来竟有人发现类星体抛射物质的速度超过光速。于是有人研究认为，如果出现超光速，时间就会倒流，物质的质量和线度将由虚数来描述。这将是一个不违反今天物理规律的新世界！当然，这有待于证实。

总之，时间箭头把自然界物质的微观、宏观、宇观各层次，把物理学、生物学、宇宙学、信息论等自然界的各种规律联系起来，关于时间箭头的种种讨论仍在继续。

5.3.6 熵概念的深化与发展

熵是源于物理学的基本概念，熵原理是自然界的基本规律，熵理论及其衍生的概念和应用正在各个领域中得到迅速而广泛的发展，成为众多学科研究的新焦点，尤其是熵和信息的密切联系和互渗正在形成一门新兴的交叉学科，有人指出，当年的工业革命是一场熵的革命，20 世纪后期引以为自豪的信息革命仅是熵研究高潮的一个前奏，本节我们着重讲两个问题：一是熵和信息；二是生物熵。

麦克斯韦妖——负熵——信息

1871 年麦克斯韦曾写过一本《热的理论》的书，在该书结尾回顾热力学第二定律时，他曾写道："我们知道，在一个温度均匀的充满空气的容器里的分子，其运动速度决不均匀。(尽管任意选取的任何大量分子的平均速率几乎完全一样。)现在让我们假定把这样一个容器分为两部分 A 和 B，在分界上有一个小孔，再设想一个能见到单个分子的精灵，这个精灵就是麦克斯韦妖。打开或关闭那个小孔，使得只有快分子从 A 跑到 B，而只有慢

分子从 B 中跑到 A。这样，它就在不消耗功的情况下，使 B 的温度升高，A 的温度降低，而与热力学第二定律发生矛盾。”1871 年以前，麦克斯韦在与友人的通讯中也不止一次谈到这个假想实验。

1929 年，L. 西拉德(Szilard, 1898—1964)分析了麦克斯韦妖的操作过程，认为此妖在操作前应先取得关于分子位置及运动的信息，然后储存起来建立记忆，这样才有操作的依据。于是，信息概念首次被用于热力学问题，西拉德的思考可以看作是信息与熵相联系的序曲。

进一步的研究主要是由法国物理学家布里渊(L. Brillouin, 1889—1969)所做。他引用信息及负熵的概念仔细分析了麦克斯韦妖的行为，定量地阐明麦克斯韦妖并不能动摇热力学第二定律(1953—1954)。如果将布里渊的论证翻译为通常的热力学语言，可以大致介绍如下：

若该妖能觉察分子运动的快慢，就要从分子那里取得信息，如接受从分子那里散射来的光，这就需要有照明分子的辐射源(例如手电筒的灯丝)。设气体的温度为 T，辐射源的温度为 T_s $(>T)$，则辐射能 E 进入容器，应有熵增

$$\Delta S_E = \frac{E}{T} - \frac{E}{T_s} > 0$$

此外，麦克斯韦妖每接收一个光子 $h\nu$，其熵增为

$$\Delta S_D = \frac{h\nu}{T}$$

而被选分子通过小孔后，将导致气体的熵减，即

$$\Delta S_G = k\ln(W + \delta W) - k\ln W < 0$$

其中 W 为整个气体原有的微观态数，$W + \delta W$ 为分离一个气体分子后的微观态数。妖的作用是使得 $\delta W < 0$，这直接导致 $\Delta S_G < 0$。于是

$$\Delta S_D + \Delta S_G = \frac{h\nu}{T} + k\ln\left(1 + \frac{\delta W}{W}\right) \approx k\left(\frac{h\nu}{kT} - \frac{|\delta W|}{W}\right)$$

显然，$|\delta W|/W \ll 1$，而光的频率 ν 与室温 T 很容易使得

$$\Delta S_D + \Delta S_G > 0$$

从而表明，全部过程并不违背热力学第二定律。

很有趣，1948 年，贝尔实验室的 C. E. 香农（Shannon，1916— ）研究沿传输线输送电讯，用类似于熵的玻尔兹曼表达式定义了信息，初步建立了信息理论。以莫尔斯电码为例，若以 0 和 1 组成 4 位数，其排列数应为 $2^4 = 16$，或者说存在着其热力学几率 $P = 16$ 的可能选择；P 愈大，对应的信息量也愈大。如果现在有 3 条载波通道，每一条通道传送的 $P = 16$，则总的 P 值应为 $2^{12} = 16^3$。考虑到信息量的相加性，即 3 条通道的总信息量应该是单一通道信息量的 3 倍，这似乎要求信息量 I 与 P 的对数成正比，或

$$I = K\ln P \tag{5.1}$$

它在形式上与熵的玻尔兹曼表达式极其相似。

信息本身既不是物质，也不是能量；信息的传递却又离不开物质载体，甚至需要外界提供能量。由于噪声的干扰、传递的差错，在输送信息的过程中，信息量则是有减无增，这也表现出过程的方向性，但是它与孤立系统的熵增刚好相反。熵是无序性或混乱程度的量度，信息则要求减少不确定性，即减小混乱程度、增强有序性。于是，信息并不对应于熵，而对应于负熵，即应将式(5.1)改写为

$$I = K\ln P_0 - K\ln P \tag{5.2}$$

它表明，始态有 P_0 种选择、末态有 P 种选择；于是，信息相当于负熵。负熵概念是 E. 薛定谔（1887—1961）最先提出的，他主张："取负号的熵，它本身就是有序的一个量度。"50 年代初，布里渊也在贝尔实验室工作，他用西拉德的思想来发展香农的工作，使信息概念从纯粹的通讯理论走进了物理学。按照这种观点，麦克斯韦妖操作后造成气体的熵减是由于信息量的增大，而信息带进了负熵。

若令式(5.2)中的比例系数 K 即是玻尔兹曼常数 k，则使信息量的单位与熵的一致；但这在通常的信息理论里很不方便，它

有自己的专用单位。

上面的叙述中，实际上是讲了“信息熵”和“统计熵”的问题，这里再补充说明一下。

若一理想气体系统从体积 V_0 等温压缩到体积 V_1，从统计观点来看其统计熵为

$$\Delta S = k\ln\frac{P_1}{P_0}$$

其中，P 为系统热力学几率。在均匀分布的条件下，一个分子在容积 V 中分配的微观方式数与 V 成正比，N 个分子在 V 中的分配方式数与 V 成正比，热力学几率就是和均匀分布的宏观态对应的微观态数目，所以有

$$P \propto V^N$$

于是

$$\Delta S = k\ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)^N = Nk\ln\frac{V_1}{V_0}$$

另一方面，在减少体积时，也减少了达到该状态的方式数。压缩前，每一个分子都在 V_0 内，可能占据的位置数目是 $V_0/\Delta V$，其中 ΔV 是某个任意小的体积，压缩后，这个分子可能的位置数减少为 $V_1/\Delta V$。由此，信息量增大时，每一个分子的信息熵增量为

$$\Delta I = -k\ln\frac{\Delta V}{V_0} + k\ln\frac{\Delta V}{V_1} = -k\ln\frac{V_1}{V_0}$$

N 个分子的信息熵增量为

$$\Delta I = -Nk\ln\frac{V_1}{V_0}$$

显然，因压缩而增加的信息熵应等于相应的统计熵的减少

$$\Delta S = -\Delta I$$

由此可见，人们把信息熵称为负熵是有道理的。因为对于熵增加原理，对应有信息量减少原理，故称信息量为负熵更为合适，否则熵既满足增加原理，又满足减少原理就会造成混乱。

由此，我们更可以看出“麦克斯韦妖——负熵——信息”之间的内在联系和关联。现在，信息作为科学概念，已有了越来越多的应用，除了物理学，它还进入到生物学、计算机科学、语言学等领域。

生物熵

1945年，量子力学的创始人之一薛定谔发表了他的杰作——《生命是什么？活细胞的物理学观》。书中提出，对生命现象进行普遍的物理解释是可能的，他把生命现象归结为少数几个基本物理问题。

薛定谔讨论的第一个问题是：生物体如何维持自身的非平衡态？他的回答是：非平衡态是通过熵从生物体流向周围环境来维持的。薛定谔讨论的第二个问题是：生命体为什么一定要由大量的原子组成？回答是由少量几个原子所构成的系统不可能是有序的，即使有序，也会被热运动起伏破坏，生命的许多基本问题与熵有着密切联系。

比薛定谔更早用热学来讨论生命的人是保尔·爱德蒙特(Bauer Edmond)，他指出：生命是开放的非平衡系统中所发生的一连串过程。

19世纪有两个光辉的演化理论：一个是达尔文的生物进化论，即生物由单细胞进化，这是一个朝着有序化方向进行的演化；另一个是孤立系的热力学系统演化论，即熵增加原理，孤立系始终朝着无序化的方向演化。这两个演化论并无矛盾，前一讲我们讲的有关开放系统的熵变问题可以将其统一。

因为生物是一个开放系统，开放系统的熵决定于系统内产生的熵，外部流入的熵及系统流向外部的熵的数量。比如，宇航员是一个开放系统，其熵的改变由两部分之和决定，一是机体内产生的熵 d_iS，二是流入的熵 d_eS。于是总熵变化为

$$\mathrm{d}S = \mathrm{d}_iS + \mathrm{d}_eS$$

$\mathrm{d}_iS > 0$，而 d_eS 取决于环境。当开放系统处在非平衡的稳定状态时，$\mathrm{d}S = 0$，故有

$$-\mathrm{d}_e S = \mathrm{d}_i S$$

这表示机体内产生的熵正好全部流出机体。一个发育完全的健康的年轻人，在较长一段时间内保持稳定的体重，就是处在这种非平衡的稳定态。发育中的儿童及更年期后的成年人的机体不再处于这种稳定态。

生物机体与外界交换物质时，生物体排泄物的熵往往大于生物体吃进的营养物质的熵。因此，总熵仍是增大的，这并不违反热力学第二定律。关于生物体与外界的交换，薛定谔有句名言曰：生物体以负熵为生。

我们来做一个游戏：在一只箱子中，放有 7 个颜色不同的球，红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。另外有一只袋子，内装有充分多的各种颜色的球。现在，从箱中取一个球让它“死亡”——扔掉，不再放回箱子；然后，再从箱中取出第二个球，同时从袋中取一个与其颜色相同的球，并将这两个同色球一起放回箱中，第二次从箱中取出的球得到“再生”。依次重复上面“死亡”和“再生”游戏，最后，箱中的球会变成单一的颜色。这里让我们看到了有序由无序中产生的过程，在生物体中就有这种生序的过程。当然，生物体中的生序过程比游戏要复杂得多。

人类是生态系统中的一个消费环节，但它有更强的负熵流机制。人类与一般生物的本质差别在于人类以社会生产和社会消费来实现与环境的物质与能量的交换及其在内部的流通。我们第一讲中讲了现实社会中的人类，其中谈到了人与自然环境的问题。现在应再提高到“熵的高度”了。本讲中我们讲了麦克斯韦妖，其实麦克斯韦妖用物理语言来讲，它是一个“熵减机器人”。它实际上反映的是开放系统的自我调控功能，而无意中却说出了人类进化过程中的一个物理实质。

作为智能生物的人类，能识别获取低熵物质。例如：食物、燃料、矿物等。将其集中起来，这犹如 5.3.6 节中所讲的使 B 室的温度升高，从而使 B 比 A 更有序，成为熵更低的系统。人类区别于其他生物的就是，生物只是直接从输入地球表层的太

阳辐射中获取低熵物质，而人类则能通过社会生产与消费，从地球表层中获取越来越强的负熵流。人类的活动不仅覆盖了整个地球表层，而且人类的活动中无论是生物过程或是非生物过程都叠加着人文过程。

人类在地球表层中的调控作用日益明显，可以推想，随着科学技术的高速发展，人类终有一日会成为地球表层的主要调控者，人文过程会成为地球表层的主导过程。

人类永远不停地劳动，不断从自然环境中获取低熵物质，克服社会经济系统不可避免的熵增，以维持自己的生存。事实上人的工作颇有成效，人们获得越来越多的低熵物质，将越来越强的负熵流输入 *B* 室，因此人类社会不断发展。但与此同时，由于 *A* 室失去的低熵物质越来越多，总熵逐渐增长，引起了日益严重的所谓生态环境退化问题。

贝特兰·罗素说过："每一个生物体都仿佛一个帝国主义者，它竭尽全力要把它所处的环境转化到它自身以及它的后代身上去。"在这个掠夺能源的过程中，这个星球上的每一个生命都在耗费着能量。它让能量流过自身系统，至少使其中一部分的能量将来不能再作功。而且毫无疑问，即使是最小的植物也要靠制造整个环境的大混乱来维持自身的秩序。

常见的食物链能更形象地说明熵的增值。化学家 G.T. 米勒用一个非常简单的食物链例子来说明这个问题。这个食物链由草、蚂蚱、青蛙、鲑鱼以及人类组成。假设一个成人为了活着每年需要吃掉 300 条鲑鱼，一条鲑鱼每年需要吃掉 300 只青蛙，一只青蛙每年需要吃掉 300 只蚂蚱，一只蚂蚱每年要吃掉 3 公斤青草。其变换式为：1 个人→300 条鲑鱼→90000 只青蛙→2700 万只蚂蚱→81000 吨青草。那么，一个人要维持较大的"秩序"状态，每年就要耗费 2700 万只蚂蚱或 81000 吨青草！给环境造成多么巨大的混乱。一个生物种类为了不使自己陷入最大的熵值，它将消耗多少个比它低一等的生物个体啊！

有人做过统计，人类总的生物量(活着的人的人体总质量)

大约在 $250\times10^6\sim300\times10^6$ 吨左右，不及生物圈总动物生物量的1/100，但人类消耗了 1/3 的生物圈净第一性生产力。所谓生物圈净第一性生产力是指绿色植物单位时间、单位空间所累积的光合量与呼吸量之差，它维持着全人类和动物的生命。

人们不仅从现存的生态系统中获取大量低熵物质，而且还大量动用地球表层过去的"积蓄"。人们开采的煤炭、石油、天然气，是地质历史时期生态系统积聚的太阳能。据统计 1970 年人类利用的燃料和其他工业总能量大约相当于 7% 的生物圈净第一性生产力，由此可知，人类社会从地球表层自然环境中攫取低熵的强度多么大，而且还在不断增长中。

地球表层是人类赖以生存的环境，如果环境的熵不断增长，严重退化，人类社会又将如何？即所谓皮之不存，毛将焉附！

5.3.7 熵理论的深化和演化

熵理论日益广泛地应用到各个学科，同时，还在不断"深化"——深入地解决自身的基础问题，力求理论有更坚实、合理、统一的基础。近年来，熵理论深化的主线是围绕非平衡熵的定义。同时，熵在热力学中的重要地位和在自然科学领域中的成功，使它逐渐向众多社会科学领域渗透。这时熵已超出了系统演化的判据和限度，超出了系统不确定程度的量度，而赋有认识论和方法论的意义。

深化的主线首先是在非平衡态的研究方面，自熵概念建立一直到 20 世纪 50 年代，物理学中的熵基本上是在平衡态的条件下定义的。熵作为不可逆过程演化的判据用来描述非平衡态的行为，而本身却只能在平衡态定义，这显然存在矛盾。普里高津把热力学引进线性非平衡区，提出局域平衡假设，并用对每一局域平衡的熵求和来定义整体非平衡态的熵。但满足局域平衡的条件是苛刻的，并非所有的非平衡态都能用局域平衡处理，所以上述矛盾并未根本解决。因此近 20 年来，如何定义和计算非平衡熵是熵概念深化的一个重要方面。

在现代各种非平衡热力学理论中,对非平衡熵有各自不同的处理方法。这些理论的共同特点是把非平衡熵作为由系统的热力学方程(如质量守恒方程、能量守恒方程、熵平衡方程等)和本构方程(即关于各种耗散流的定律)决定的具有李雅普诺夫函数特征的热力学泛函。不同的是各种理论所采用的本构方程及推理方法有别,所得到的非平衡熵的形式各异,因此各种结果的精确性和普适性也有差别。另外关于非平衡熵存在的惟一性尚未得到严格的普遍证明,而只在常见的具体的非平衡系统中证实了非平衡熵存在的惟一性。

非平衡熵综合反映了系统的微观性质与宏观性质,所以它的定义的最终解决还要取决于统计力学的解释,这方面的工作艰难而复杂,各学派已进行了多方面探索。但目前的工作尚未满足这些基本要求。

熵产生的极值性质研究是近年来熵理论深化的又一个重要课题。熵作为表征不可逆过程自发趋势的限度,表现为在一定条件下具有的某种极值性质。众所周知,孤立系统平衡态的熵最大。对于邻近平衡的线性非平衡区,达到定态时熵产生最小,这是著名的最小熵产生原理。近年来对此问题的研究有了许多新的进展,已经发现并证明在两相共存含有平衡相变的热传播过程中,达到严格的线性非平衡定态时,熵产生并不取得极小值。另外,还发现在远离平衡的强激波中,熵产生都取极大值。因此深入研究熵产生的新的更普适的极值性质是十分诱人而有意义的。

另外,非平衡定向辐射场的熵的计算和能"质"的判定,也是熵理论深化中的论而未决的问题。

围绕非平衡熵的定义等问题展开的研究是熵概念深化的主线,这些问题的解决必将推进熵理论的应用和发展。

近年来,复杂性的研究日益深入。熵能否描述复杂性,这是人们探讨较多的问题。

Kolmogorov(1965 年,1968 年),Chaitin(1970 年,1974 年)

首先提出了用系统的复杂度来定义熵并称为“算法熵”。他们定义的“复杂度”是“用最好的方法求解该问题时所需要的最小信息量”,对于一个系统状态的复杂度,就是“用最佳的算法表示系统的状态序所需的极少程度的长度”。这里的算法熵度量的是系统的某一确定状态的复杂程度,而不是系统状态的不确定程度,它不是物理熵。有人以生物大分子为例在算法信息论的基础上提出系统的复杂性应分三个层次:排列复杂性(用信息熵 $S=-\sum p_i \ln p_i$ 来度量),组织复杂性(用算法熵来度量),功能复杂性(用有关序列中包含的活性单元的多少及活性程度,即信息值来度量)。但未明确指出与这三种复杂性对应的熵是否都是物理熵。显然,第一种是不确定而无序的复杂性,例如,艺术界提出了“艺术熵”。而第二、三种则是确定而有序的复杂性,是不同性质的复杂性。

当然,这些对于文科大学生来说,似乎深了些,高了些,但我们仅要求大家对之有一个粗略的了解。

如前所述,当今在社会科学的众多领域中,都广泛地涉及了熵的概念及其应用问题。引进熵的概念,运用熵的基本思想和基本方法来研究本学科的基本问题,也是文科大学生值得学习、研究的领域。

第六讲　近代科学的重要基础——电磁学

6.1　电磁学发展的轨迹

电磁现象很早就为人类所注意了，它经历了几个不同的阶段。

6.1.1　“天上”与“人间”和“定性”与“定量”

公元前6～7世纪发现了磁石吸铁，磁勺指南，摩擦起电以及雷电等许多自然现象，由于对其认识不够，对这些令古代人吃惊的现象总是和天上神明联想到一起去了，在西方，在公元前2000年左右古代巴比伦的圆筒印章上刻着持有雷斧的女神(图6.1)。后来又把雷作为宙斯向外投出的雷斧(图6.2)，以及宙斯投出的其他工具(图6.3)。在东方，我国的民间有的把主宰雷电之神称为雷祖(图6.4)。这个雷祖是受上天派遣而管理雷电的神明，他是一尊官员一样的神仙，所以显得文质彬彬。然而，民间的老百姓慑于雷电、闪光的威力，更多的场合是把有关雷电之神分为电母(图6.5)雷公(图6.6)来分别供奉的，在一些庙宇中，也有他们应有的一席之地。而由于隆隆的雷声令人害怕，所以雷公的形象就显得比电母要狰狞。图6.7是西藏所供奉的带有雷斧的雷神。在雷神传到东邻日本后，不仅带有雷斧，而且手臂也多了几个(图6.8)。

从有史记载以来，中国人民在历史上是较早观察研究了雷电现象的，他们形象地创造出了雷的古文字，如畕、靁等都表明了他们的智慧和创造力。他们已经注意到雷电是来自两种对立的实体形成的，如日和月，而且是在雨天里常见的现象。后来人们又注意到摩擦起电的现象，如古希腊的哲学家泰勒斯(Thales)和



图 6.1



图 6.2

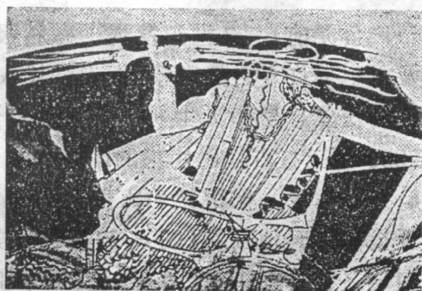


图 6.3



图 6.4


图 6.5


图 6.6


图 6.7


图 6.8

中国的王充等都研究了经过摩擦的琥珀能吸引草屑、芥籽的现象。而在远航船的桅杆的顶端会发出火花更是令船员们不解而视为不祥之兆,称之为"埃尔摩火"。对这些零散的静电现象较系统的观察和总结是由 16 世纪的英国科学家、英皇的御医吉尔伯特完成的,他从摩擦起电的实验入手对静电现象作了定性的观察和解释。

当时有很多人想把自然界的现象,如天上的雷电与地上、人

间的静电之间有无区别搞清，也有人想能否把天上的引到人间来，为此，也有人付出宝贵的生命。

大约在1660年德国马德堡一位酿酒商，也是工程师的奥托·冯·格里凯发明了第一台能产生大量电荷的摩擦起电机。一直到19世纪，这种摩擦起电机才被霍尔兹和托普尔发明的感应起电机所代替。约在1720年，英国的格雷对电荷能不能传递进行了研究，他发现不仅摩擦可以使物体带电，别的方法比如传递也可以使物体带电，他还发现导体和绝缘体的区别。法国皇家花园里的一位管家杜菲发现绝缘体也可以通过摩擦的办法起电。他让助手把自己用绝缘丝绳吊在天花板上，亲身作人体带电实验，并发现了同种电荷相斥、异种电荷相吸的规律。荷兰莱顿大学的物理教授马森布洛克为了寻找一种保存电的方法，于1745年做了莱顿瓶实验，发明了能蓄电的莱顿瓶。这一发明，为科学界提供了一种贮存电的有效方法，为进一步研究电现象提供了一种新的强有力的手段。对电知识的传播和发展起了重要的作用。有人用莱顿瓶作火花放电杀老鼠的表演，有人用它来点燃酒精和火药。其中最壮观的一次示范表演是法国人诺莱特在巴黎一座大教堂前，邀请法皇路易十五的皇室成员临场观看莱顿瓶的表演。他调来了700个修道士，让他们手拉手排成一行，全长约1 275米，然后诺莱特让排头的修道士用手拿住莱顿瓶，让排尾的修道士用手握住莱顿瓶的引线，接着让莱顿瓶放电，一瞬间700多个修道士因受电击几乎同时跳了起来，在场的人无不为之目瞪口呆。诺莱特以令人信服的证据向人们表演了电的巨大威力。美国费城的本杰明·富兰克林利用莱顿瓶发现了正电和负电及电荷的守恒定律。他的另一项重大的工作是统一了天电和地电，彻底破除了人们对雷电的迷信。1752年，他做了著名的风筝实验，将雷雨云中的电荷收集到莱顿瓶中，并证明这些电荷与实验室中其他电荷性质是一样的。为了引下天电，他本人曾被雷电击晕过去，他苏醒过来后还风趣地说："好家伙，我本想电死一只火鸡，结果差一点电死一个傻瓜。"富兰克林

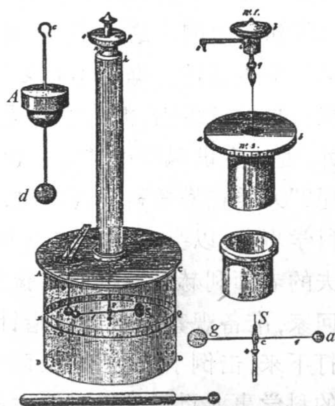
的实验惊动了费城教会，虽然他们斥责富兰克林冒犯神权，是对上帝和雷公的大逆不道，但富兰克林仍坚持研究，制造了世界上第一个避雷针。据说100多年之后，费城盖了一座新的教堂，神职人员怕遭雷击，派人去找爱迪生，请教他新教堂要不要装避雷针，爱迪生讥讽地说："雷公也有疏忽大意的时候，你说要不要装呢？"人类在攀登科学高峰时，不总是一帆风顺的，有人甚至为了科学事业，以身殉职。1753年7月26日，俄国科学家罗蒙诺索夫的老师利赫曼教授在实验室作实验时，看到雷雨欲来，便匆匆回家，准备观察检电器的指针有什么变化。不料一个闷雷突然打下来，击倒了他，待罗蒙诺索夫闻讯赶来时，利赫曼已为人类的科学事业贡献了自己的生命。

物理学告诉我们，科学研究中"没有量化，就不可能深化"，对于电现象，从英国的卡文迪什和法国的库仑开始进行了定量研究，尤其是贝内特发明的历史上的第一个验电器，和库仑发明的扭秤则揭示出了电荷的种类，电量的多少，电荷相互作用力的大小等许多定量的静电规律。

1785年，库仑根据自己有关扭力方面的知识，设计制作了一台精确的扭秤，建立了著名的库仑定律：电荷之间的作用力与其距离的平方成反比，和两者所带电量的乘积成正比。库仑定律是电磁理论的基础，如果不成立，那么电学就完全是另一种模样了，由于其地位太重要了，这个课题一直为历代物理学家高度重视，库仑定律的验证迄今未停，而且越做越精确。库仑的扭秤实验的情况如下：

用一个直径和高均为12英寸的玻璃圆缸，上盖一块玻璃杯。盖板上有两个洞。中间一个洞装有一根高为24英寸的玻璃管，上端有一银质悬丝S，悬丝下挂一横杆。杆的一端为木质小球a，另一端贴一小纸片g，作调节平衡用，玻璃圆缸上刻有360个刻度，悬丝自由放松时，横杆上的小木球指零。然后他用另一个小球d带电，并使两小球接触后分开，以致两小球带同种等量的电荷，互相排斥。实测数据如下：





库仑及其扭秤实验

当两个小球相距 36 个刻度,扭丝转 36°;

当两个小球相距 18 个刻度,扭丝转 144°;

当两个小球相距 8.5 个刻度,扭丝转 575.5°。

规律为距离比 $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{4}$,而转角比为 1:4:16。

这样得出了电的排斥力平方的反比律,即库仑定律。

库仑又用振荡法证明了异号电荷吸引力也遵守平方反比律,他的实验误差偏离平方为 4×10^{-2},从而使电力的平方反比律得到普遍承认。

在库仑作扭秤实验前卡文迪什测带电情况时对电力的作用也已有 $F=\frac{k}{r^n}$, $n=2\pm\frac{1}{50}$的实验结果。当今的科学实验仪器配合理论分析,得出的平方反比的偏差为 3×10^{-16},平方反比定律在原子物理中也适用。

1785 年库仑定律建立以后,法国数学家西蒙·泊松于 1812 年用数学方法证明了,处于静电平衡的导体内部任何带电粒子所受的力为零,否则导体内部会有电荷流动,1813 年德国的高斯得出了真空中的电通量的高斯定理,即

$$\oint_S E\cos\theta \mathrm{d}S=\frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i$$

1828 年英国数学家乔治·格林第一个提出势的概念。从此推出静电学的不少重要结果。

6.1.2 “静”与“动”的电磁互生

在1800 年以前只是一个与技术无缘的“静”电学年代。1786 年伽伐尼发现青蛙的肌肉因与手术刀接触而会发生痉挛的现象，他称其为“动物电流”。这样一来“静”电变成“动”电，但未能获得稳定、持续的电流，也未能和工程技术连接起来，因此公元 1800 年意大利的伏打发明的电堆揭开了电学研究中的新的一页，“动”电时代来到了。

1820 年下半年是电磁学的发展时期，奥斯特根据电通过直径较小的导线导致发热，继续减小导线直径会导致发光这一现象，推测若直径再小会导致磁效应，但做实验没有获得结果。后来他想是否不是沿着电流方向的纵效应而是垂直电流方向的横效应呢？奥斯特基于这一思想又做了各种实验，在同年 4 月一次讲课中他偶然发现在电流附近的小磁针微微地跳动了几下，奥斯特紧紧抓住了这一现象，他苦苦进行了为时三个月的连续的实验研究，终于在 1820 年 7 月 21 日，发表了题为《关于磁针与电流碰撞的实验》的论文，向科学界宣布了“电流的磁效应”，轰动了整个欧洲，1820 年 7 月 21 日，作为电磁学发展史上一个划时代的日子载入了史册。



奥斯特(1777—1851)
丹麦物理学家

奥斯特的发现极大地震动了法国学术界，因为他们长期以来信奉库仑的信条，认为电和磁已被证明是不可能发生相互作用的两种现象。1820 年 8 月间，法国物理学家阿拉戈在瑞士听到了奥斯特发现电流的磁效应的消

息,立即敏锐地感到这一成果的重要性,迅即于9月初赶回法国,刚回到巴黎不久,他就于11日向法国科学院报告了奥斯特的这个最新发现。他详细地向科学院的同事们描述了电流磁效应的实验。阿拉戈的报告,立即在法国科学界引起了巨大的反响。当时,在科学上极其敏感、最能接受他人成果的法国物理学家安培,对此作出了异乎寻常的反应。他第二天就重复了奥斯特的实验,并加以发展。他重复做了电流对磁针的作用的实验,提出了圆形电流产生磁性的可能性。安培还在这个实验中发现磁性转动的方向与电流方向的关系服从右手定则。后人称它为安培右手定则。9月25日,他向法国科学院提出了第二篇论文,阐述了他用实验证明了两条平行载流导线,当电流方向相同时互相吸引,当电流方向相反时互相排斥。以后安培又用各种形状的曲线载流导线,研究它们之间的相互作用,并于10月9日向法国科学院提出了第三篇论文,至12月4日他提出了安培定律。

这是电流元之间相互作用的基本定律,通常表达为 $\mathrm{d}\boldsymbol{F}=I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{B}$,电流元不同于点电荷,它不能单独在实验室内实现,因此它不能直接从实验得到,只有闭合回路相互作用的规律才能由实验来检验。因此安培定律的表达式实际上是根据安培的四个历史上很有名的实验从理论上推导出来的。



安培(1775—1836)
法国物理学家

安培是法国科学院院士,当过数学教授、实验物理教授,他的生活很艰苦,18岁丧父,29岁丧妻,这两大不幸对他打击很大,所以只活到了61岁。安培

对电磁学的贡献很大，半个世纪以后，麦克斯韦称安培是"电磁学的牛顿"。

奥斯特的实验迅速在两个方面取得惊人的突进，一个是技术上立即诞生了电流计和制成了电磁铁；另一个是架起了一座连通电和磁之间的桥梁，导致电与磁关系的一系列发现，使电磁学作为一个整体的学科在世界上出现。这时，人们对电流能引起磁现象已深信无疑，但是，沿着相反方面能不能走通？许多科学家都在积极地探索这个问题。安培也是其中之一，遗憾的是他一直着眼于稳态现象，根本没有想到暂态现象，所以他失败了。还有瑞士物理学家科拉顿企图用磁铁在线圈中产生电流。1825 年，他用一个线圈与一个检流计连成一闭合回路，为了使磁铁不至于影响检流计中的小磁针，特意将检流针放在隔壁的房间里，科拉顿用磁铁棒在线圈中不断地插入，拔出，然后又跑到另一房间里去观察检流计，每次都得到零结果。科拉顿的实验装置设计得完全正确。他已经跨进了发现电磁感应规律的大门，可是却犯了和安培同样的毛病，没有想到暂态效应。靠他这样来回奔跑，当然无法观察到电磁感应。1827 年，美国物理学家亨利用纱包铜线在铁芯上绕了两层，然后在铜线中通电，发现铁芯上仅仅 3 公斤的铁片居然吸起了 300 公斤重的物体，亨利以此为开端，发现了自感现象。

发现电磁感应的是英国物理学家、化学家法拉第，他从小生长在贫苦的家庭中，父亲是个铁匠，母亲识字不多，不可能使他受到较多的教育。9 岁时父亲去世了，法拉第不得不去文具店当学徒，他 14 岁那年全家迁往伦敦。经人介绍，进了伦敦的李波书店当学徒工，装订书报，法拉第被大量的书报吸引住了。有一次在装订《大英百科全书》时，对电学的文章产生了强烈的兴趣，后来又被《化学对话》所吸



法拉第(1791—1867)
英国物理学家

引，从此对自然科学倾注了巨大的热情。在他7年学徒生活中，一切通过他那儿的新书他都学了，因此最早得到情报，学的知识最多。他是7年的订书工，也是7年的大学生。知识在于积累，才智在于勤奋，成功在于信心，这是一条真理。1812年的一天，书店老板让他上街买东西，他看到英国皇家学会挂着科学讲座的海报，他赶去听了，听得很感兴趣。说老实话，当时在场听报告的人，能听懂的是少数，但法拉第却是其中之一。从中他受到启发，将听讲的记录装成书册，又写一封毛遂自荐的信一并寄给戴维，在戴维的介绍下，法拉第终于进入皇家学院实验室并当了他的助手，法拉第在实验室工作半年后，随戴维去欧洲旅行。对法拉第来说，这次旅行相当于上了“社会大学”。他结识了许多科学家，如盖吕萨克、安培等，还学到许多科学知识，大开眼界。法拉第回国后，发挥出惊人的才干，不断取得成果，自奥斯特发现电流的磁效应之后，他一直在想，既然电能生磁，为什么磁不能生电，于是他在日记上写道：“一定让磁生电”，法拉第朝着这个目标，断断续续地研究了近10年。

从他的日记中我们看到，电磁感应的发现是法拉第意料中的事，使他感到意外的是电磁感应是一种短暂效应，他在日记中突出地记录了这一点。

发现了电磁感应后，法拉第花了近一年的时间（1831年8月29日至1832年7月11日）对它做了专门详细的研究，写下了64页日记共441条记录，并画了不少说明的草图。其中重要的发现有：

1831年9月24日，仅用磁棒和绕在铁棒上的导线产生电磁感应，他称之为“把磁转化为电的不同方法”；

1831年10月17日，用磁棒插入或抽出线圈，产生感应电流；

1831年10月28日发明圆盘发电机；

1833年发现电解定律；

1833年发现自感；

1845 年发现光的偏振面的磁致旋转(即法拉第效应);

1845 年发现抗磁性,等等。

法拉第的贡献很多,就电磁感应而言,可归纳为:

(1) 把握住暂态效应,发现了电磁感应现象。

(2) 广泛而全面地研究了电磁感应现象,1831 年 11 月法拉第指出:"① 正在变化的电流;② 正在变化的磁场;③ 稳恒电流的运动;④ 导体在磁场中运动,都会产生感应电流。"他为电磁感应定律的建立奠定了实验基础。1832 年法拉第发现,在相同条件下不同金属导体中产生的感应电流与导体的导电能力成正比。他由此意识到感应电流是由与导体无关的感应电动势产生的,这正是在各种情形下产生感应电流的关键,由此可见,法拉第经过归纳提炼,逐步掌握了问题的实质。

(3) 用力线说明产生感应电动势的原因,为定律的建立提供了物理图像。力线的概念是以近距作用观点解释电磁相互作用。他认为磁极和带电体周围充满了磁力线和电力线,它们是电力和磁力的传递者,力线的疏密描绘了作用的强弱。

在解释电磁感应的过程中,法拉第把静态相互作用的力线图像发展到动态。他认为当通过回路的磁力线根数变化时,回路里就会产生感应电流,从而揭示了感应电动势产生的原因。1851 年法拉第在《论磁力线》中指出:"无论导线是垂直地还是倾斜地跨过磁力线,也无论它是沿某一方向或另一方向,该导线都把它所跨过的力线所表示的力汇总起来,"因而"形成电流的力正比于切割的磁力线数"。英国的开尔文勋爵对法拉第的力线评价很高。他说:"在法拉第的许多贡献中,最伟大的一个就是力线概念了,我想借助于它就可以把电场和磁场的许多性质,以最简单而极富启发性的形式表示出来。"值得一提的是法拉第具有深邃的洞察力,1832 年他写了一封密封的信给英国皇家学会,信封上面写着:"现在应当收藏在皇家学会的档案馆里的一些新的观点。"这封信在档案馆里躺了 100 多年,直到 1938 年才被后人发现,启了封。法拉第在信中预言了磁感应和电感应的

传播，暗示了电磁波存在的可能性，还预言了光可能是一种电磁振动的传播。他在信的最后写道："就我所知，现在除了我以外，科学家中还没有人持类似的观念。"法拉第是一位靠自学成才的伟大科学家。他遵照他的"一辈子当一个平凡的迈克尔·法拉第"的意愿，始终如一地实践了自己"献身于科学"的诺言。后人为了纪念法拉第，用他的名字命名电容的单位为法拉，简称法(F)。

1832 年，俄国物理学家楞次受到法拉第的启发，开始做了一系列的电磁实验，1933 年发现了楞次定律，更明显地指出了感生电流的方向。

法拉第对电磁感应的贡献生动地说明，精巧的实验和深刻的洞察力把物理学推向前进，这是物理学史上一个杰出的范例。遗憾的是法拉第数学基础较差，没有给出电磁感应定律定量的数学表达式。对于电磁感应定律的定量表达式，首先作出贡献的是法拉第同时代的德国科学家 F.纽曼，他在法拉第深刻的物理思想的启发下，作了一些假设得出我们常见的电磁感应定律：

$$\mathscr{E} = -\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

几乎与纽曼同时，另一个德国物理学家 W.韦伯，根据法拉第关于电流的看法，由安培公式导出：

$$\mathscr{E} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

纽曼和韦伯都持超距作用观点，他们的出发点和方法都不相同，但都在 1846 年提出了同样的电磁感应定律表达式。如果说纽曼是以假设的方式给出了电磁感应定律的，那么，韦伯则是从安培公式推导出电磁感应定律的。因此，韦伯的工作表明，动生电动势是安培公式的结果，而不是独立的新形象，这就为后来动生和感生电动势的区分，特别是为麦克斯韦提出涡旋电场概念创造了条件。

6.1.3 伟大的综合——电磁场理论的建立

英国著名的物理学家麦克斯韦在电磁学中的工作是 19 世

纪物理学中最伟大的成就，是继牛顿之后的历史上又一划时代的贡献。他 15 岁开始写文投稿，16 岁进入剑桥大学，年轻有为，才华横溢。

麦克斯韦称纽曼和韦伯的理论“极为精巧”并“令人惊叹”。然而他指出“依赖于粒子速度的力超距作用，并将其用于粒子的假设中是包含着机制上的困难的，这阻止我认为这一理论是最终的理论。所以我宁愿从另一方面寻找对事实的解释，假设它们是被周围媒质以及激发物体中发生的作用所产生，而无须假定可能存在直接作用，尽力解释远距离物体的作用……”麦克斯韦说“我所建议的理论可以称为电磁场理论，因为它必须涉及电或磁物体附近的空间，它也可以称为动力学的理论，因为它假设在空间存在运动的物质，导致可观察的电磁现象。”

在建立电磁场理论的过程中，跨出极为重要一步的是汤姆孙的类比研究。1842 年，他把含带电导体内的静电力分布与无限固体中的热流分布相比较，指出前种情形下的等势面与后种情形下的等温面相对应，前者的电荷与后者的热源相对应。人们知道，热理论的公式是以连续介质中相邻粒子相互作用为前提得出的，这种类比是否可以把电作用看作是经某种连续媒质依次传递而实现呢？

汤姆孙研究了电现象和弹性现象的相似性。他考察了处于应力状态的不可压缩弹性固体的平衡，指出代表弹性位移的矢量分布可与静电体系的电力分布相比拟，再次暗示了在非稳恒情形下电磁作用的传播图像。

汤姆孙的另一类比来源于光偏振面的磁致旋转，认为磁具有旋转的性质。（1858 年，亥姆霍兹关于涡旋运动的研究使得这一观点加强了。）他指出如果电流产生的磁场可以和不可压缩的流体类比，则磁矢量可以用流体速度代表，从而电流对应于流体的涡旋线，这一类比可将流体力学的许多定理与电学的定理对应起来。

汤姆孙的类比，有力支持了法拉第通过力线表达出来的近

距作用观点，为麦克斯韦建立电磁场理论的工作提供了极为重要的暗示、联想和启迪。

应该指出，类比研究在于寻找和揭示不同事物在一定范围内所具有的形式上的相似性，它常常预示着重大的发现或突破，类比研究的意义不仅在于移植数学工具或表达方式，还在于启发物理思想，帮助人们去认识和发现一些尚待研究的物理过程和规律。

当然，类比不是论证，它提供的只是启发和可能性而不是结论。所以它不能取代理论分析和实验研究，而应该由后者来验证和核实，决定对它的弃取和修正。

法拉第在研究电磁现象的过程中，凭借他高超的实验技巧和丰富的想像力，提出了非常深刻的"力线"和"场"的物理思想。他设想，在带电体、磁体和电流周围的空间都存在着某种连续介质，起着传递电力和磁力的媒介作用。他把它们称为"电场"和"磁场"。这是物理学中第一次提出的"场"的概念，法拉第类比于流体场，对电场和磁场的物理图景作了直观的描述。他提出，场是由力线组成的，许多力线组成一个力管，就像流体中许多流线组成一个流管一样。力线将相反的电荷和磁极联系起来，力线上任一点的切线方向就是该点的场强方向，力线的疏密程度表示不同点场强的大小(图 6.9)。



图 6.9　法拉第力线与力管

法拉第认为力线有物理实在的性质。他还在一张纸上撒上铁屑，用磁棒在其下面轻轻振动，铁屑形成规则的曲线表示力线的实在性(图 6.10)。但由于数学水平不够，法拉第无法把他从

类比引发的丰富的想像提高到定量理论。

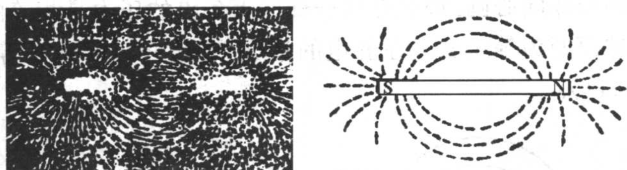


图 6.10　条形磁铁的力线分布

麦克斯韦深刻地洞察出法拉第的天才思想，以法拉第的力线作为研究的起点，借助他杰出的数学才能和得益于类比的丰富的想像，把法拉第的思想升华到新的高度，最终完成了电磁场理论。

1855～1856 年，麦克斯韦完成了关于电磁学的第一篇重要论文——《论法拉第的力线》。在这篇论文的第一部分中，他阐述了力线和不可压缩流体之间的类比，将汤姆孙的论题做了重要发展，它将磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 分别与流体力学的“流量”和“力”相对应，将电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 和电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$ 也分别地应为“流量”和“力”。流量是遵从连续性方程的矢量，它可以遍及曲面作积分，而力则可沿着线段积分，所以在麦克斯韦方程的形式中有

$$\iint_S \boldsymbol{D}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S},\quad \iint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S},\quad \oint_L \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l},\quad \oint_L \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

麦克斯韦关于电磁学第二篇重要论文是《论物理力线》(1861～1862 年)，在这篇论文中，他精心设计了电磁作用的力学模型，提出了流旋场的概念。他认为，因为均匀介质中离开一个流体源(可以是有质流体源或是无质流体的热源)r 处的压力(或温度)为

$$p(r)=\frac{kQ}{4\pi r}$$

式中 Q 表示单位时间内通过包围流体源的任意封闭曲面的总流量(或总热量)，r 为某点到源的距离，k 是与介质有关的系

数。麦克斯韦设想:在上述流体情况下,如果流体源是一点,以它为圆心作同心圆,那么在同一球面上各点的压力是相等的,这样的球面便为等压面。在静电的情况下,这些球面便是等势面(图 6.11)。

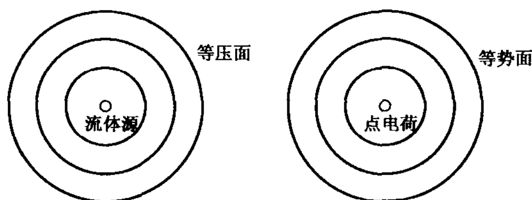


图 6.11　等压面与等势面

麦克斯韦从这个类比中发现电场与流体力场的相似性,从而把有关流体力场的数学结论推广到电场中去。麦克斯韦说:“在电学中势对于电,在流体力学中压力对于流体和在热力学中温度对于热,有着共同的关系。电、流体和热全都趋向于由一个地方流到另一地方,只要势、压力或温度在第一个地方高于第二个地方,这种情况都能发生。”

麦克斯韦的这个类比,我们可以把它表示如表 6.1。

表 6.1

流　体　场	电　　场
流体场中流体总是从压力高处流向压力低处	电场中正电荷总是从高电势处移向低电势处
流体场中的流线	电场中的电力线
流体场中的压强 p	电场中的电势 U
均匀无限大介质中,距流体源 r 处的任一点流体的压强 $$p(r)=\frac{kQ}{4\pi r}$$	真空中距点电荷 r 处的任一点的电势 $$U(r)=\frac{kQ}{4\pi r}$$
(Q 为单位时间通过包围流体源的任意曲面的总流量,k 为系数)	(Q 为点电荷源的电量,可以看成“电通量”,相当于电力线的总量,k 为系数)

对照这样的类比,根据电场强度和电势间的关系式,就可推出真空中点电荷电场强度的表达式

$$E = \frac{kQ}{4\pi r^2}$$

如果令 $D = \frac{Q}{4\pi r^2}$ 表示通过球面上单位面积的“电通量”，即相当于通过球面上单位面积的电力线条数（图 6.12），于是就可得到一个一般公式：

$$E = kD$$

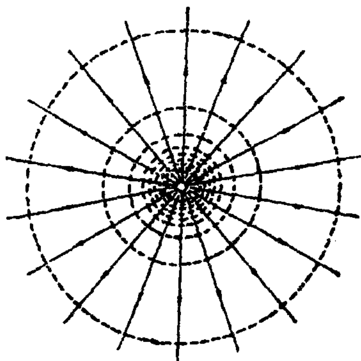


图 6.12 通过单位面积的电力线

这也就是说，在电场中某处的电场强度跟通过该处单位面积上的电力线条数成正比。这样，麦克斯韦通过与流体场的类比，就赋予法拉第的力线以实在的物理含义。麦克斯韦说：“我企图把一个空间画力线的清楚概念摆在一个几何画家的面前，并利用一个流体的流线概念，说明如何画出这些力线来。”他还提出：“导体周围的带电粒子现在可以作弹性位移；变化的电流不再像管中的流水那样完全限制起来，它能以一定的分量进入导线周围空间。”这是麦克斯韦对“位移电流”最初的认识，并且在推导中得出电磁场量的传播速度 $v = c$（光速）。因此他在论文中振奋地用醒目的斜体字写道：“我们不可避免地推论，光是媒质中起源于电磁现象的横波。”麦克斯韦在这篇论文中逐渐形成和把握住的“位移电流”和“电磁波”的观念，正是其中的核心和关键。

麦克斯韦的第三篇论文——《电磁场的动力学理论》(1864年)是继牛顿力学之后,物理学史上又一座拔地而起的不朽丰碑。麦克斯韦又根据法拉第的"力管收缩趋势",电场中的导体处于一种特殊的"电紧张状态"的设想,定义一个新的矢量函数来描述电磁场,并重新概括了当时已经发现的电磁学中的6条基本定律。

麦克斯韦的这篇论文用数学形式精确地表示了法拉第的力线图像。1860年,他带着这篇论文拜访已年近七旬的法拉第时,法拉第大为赞赏说:"我惊讶地看到,这个主题居然处理得如此之好!"并热情地鼓励麦克斯韦继续探索。百余年后的今天,人们仍然折服于它的完整、系统和严密,仍然处处感受到它的强大威力和广泛影响,它不愧为人类认识史上不可多得的理论珍品之一。

1873年麦克斯出版了巨著《电磁学理论》,在这部著作中,麦克斯韦更为彻底地应用动力学原理发展了他的动力学理论体系,使得他的电磁场理论更加完善,基础亦更为坚实。

麦克斯韦电磁场理论的建立,为我们提供了丰富的方法论的教益和启迪:

(1) 寻找不同理论之间的联系,建立统一的动力学解释是理论工作的一贯追求。麦克斯韦统一了电学、磁学和光学;爱因斯坦狭义相对论统一了电磁、光和时空,都是物理学各时代的里程碑。

(2) 类比研究在科学发现中具有重大意义,不同事物外在的相似可能隐含着内在的相同的缘由,这是自然提供的一种暗示。麦克斯韦多次使用类比而逐步揭示了科学的真理。

(3) 未知世界常常表现出传统的观念所意想不到的属性,这就需要广开思路,甚至需要有标新立异之勇气。麦克斯韦洞察到的位移电流和光,是认识电磁波的最好例证。

(4) 广博的知识是科学创造的必要条件,麦克斯韦建立电磁场理论过程中涉及的知识面之广是令人惊叹的。当前科学发

展纵横交错，新兴学科、交叉学科、边缘学科不断涌现兴起，这一点更为需要。

(5) 用数学工具精确地表述科学思想是科学发展的要求，也是科学成熟的标志之一，麦克斯韦就是凭借他深厚的数学基础和娴熟的数学技巧，将他的思想、模型和图像最终表述为描述电磁场的基本方程组。

(6) 和谐是完善的理论的必需要素，比较纽曼和韦伯的理论，麦克斯韦电磁场理论更显得其独秀一枝。

麦克斯韦通过电磁现象和力学类比，提出关于力线的机械模型(电磁以太模型)，将电和磁的量联系起来，又用拉格朗日和哈密顿创立的数学方法，类比流体力学方程，导出电磁场的波动方程，预言了电磁波的存在，并建立了光的电磁理论。麦克斯韦说："这一速度(指推算出的电磁波速度)与光速如此接近，看来我们有强烈的理由推断，光本身(包括辐射热以及其他辐射，如果有的话)乃是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振动。"麦克斯韦以他杰出的数理才能，将电磁理论一度推到了顶峰，把原来互相独立的电学、磁学和光学三个部分结合起来，成为19世纪中叶物理学上实现的一次重大综合。无怪乎人们评论麦克斯韦一生功绩时说："他的名字将永远闪烁在经典电磁理论的大门之上。"

当然，人们同样也不会忘记，类比曾怎样地拓宽了麦克斯韦的思路，使他从流体力学跃上电动力学的新台阶。麦克斯韦说："我认为依靠物理的类比，一门科学的规律与另一门科学的规律之间的部分类似，将使我们能从这两门学科中的一门科学来说明另外的一门科学。"麦克斯韦类比的成功，充分说明了这个论断的正确。

6.1.4 从局域于电路到辐射向空间

麦克斯韦建立了关于感应电场及位移电流的假设，即变化的磁场引起变化的电场而变化的电场又会引起变化的磁场，从

麦克斯韦方程可得出这种变化不止是存在于电路中(也就是局域于电路中不同的元件中),但如何用实验来验证是一个重要的问题。而赫兹发明的电磁波发生器实验表明,这种电磁振荡不仅只是局域于电路中,还能以电磁波的形式向外辐射,若把电磁波发生器改装成检波器,再改变电路中某些元件的参数就能使这个电路的固有频率产生改变,当外来频率与这个固有频率相同时,就会产生谐振,这样,就表明了:

(1) 电磁振荡可以从局域于电路中改变为辐射向空间;

(2) 电磁发生器也可以改装为检波器,即既可辐射出电磁波又能接收到外来的电磁波;

(3) 由于电磁波振荡而使电磁波向外辐射传播就会引起信息的向外传播,因而这也就为信息传播奠定了基础,提供了方法。

以上不仅是电磁学发展中的几个重要阶段,而且也告诉了我们电磁波的传播为信息社会的发展所起的重大的作用。

6.2 电场与磁场的基础知识

6.2.1 静电场

在法拉第之前,人们认为两个相隔一定距离的带电体、磁体或电流之间的相互作用是所谓超距作用,即这些作用的传递既不需要媒介,也不需要时间。从法拉第开始到麦克斯韦,许多科学家经过深入的分析研究,逐步形成了电场和磁场的概念,认识到电磁相互作用是以电场和磁场来传递的,这种传递的速度与光速相同。现代科学和实践业已证明,场是物质存在的一种形式。在一定条件下,电磁场可以脱离电荷和电流独立存在,具有自己的运动规律。电磁场和实物(即由原子、分子等组成的物质)一样具有能量、动量等属性。不同的是电磁场的静质量为零,而且若干电磁场可以同时占据同一空间,也就是说,场是可

叠加的。

根据场的观点，任何电荷将在自己周围的空间激发电场。电场对处于其中的任何其他带电体都有力的作用，这种力称为电场力。也就是说，电荷之间的相互作用力是通过电场实现的，即

$$\text{电荷}\underset{\text{作用}}{\overset{\text{激发}}{\rightleftarrows}}\boxed{\text{电　场}}\underset{\text{激发}}{\overset{\text{作用}}{\rightleftarrows}}\text{电荷}$$

下面讨论一种简单的情况，即相对于观察者为静止的电荷在其周围空间激发的电场，这种电场称为静电场，简称为电场。

电场强度

电场中各点处场的特性，可利用试验电荷进行研究。为确定起见，通常规定试验电荷带正电。试验电荷还应满足两个条件：① 所带电荷 q_0 足够小，把它引入被测电场中，在实验精度范围内，不会影响原有电场的分布；② 线度很小，可以视为点电荷，以便确定其空间位置。

研究的结果表明，把试验电荷放在电场中任一给定点（称为场点）处，改变试验电荷所带电荷 q_0 的量值，各试验电荷所受电场力 $\boldsymbol{F}$ 的大小将与电荷量成正比地改变。力的方向不变，即对给定的场点，比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 具有确定的大小和方向。但是，在不同的场点，比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 的大小和方向一般不同，这说明比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 只与试验电荷所在场点的位置有关，而与试验电荷的量值无关，即只是场点位置的函数。这一函数是从力的方面反映了电场本身所具有客观性质。因此，我们将比值 $\boldsymbol{F}/q_0$ 定义为电场强度，用 $\boldsymbol{E}$ 表示，有

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \tag{6.1}$$

电场强度是矢量。由式(6.1)可知，在电场中某点处，电场强度的大小等于单位正电荷在该点所受电场力的大小，其方向与单位正电荷在该点所受电场力的方向相同。在 SI 制中，电场强度的单位是牛/库($\mathrm{N\cdot C^{-1}}$)。

在已知电场强度分布的条件下，一个具有电荷 q 的点电荷

在该场点所受电场力为

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E} \tag{6.2}$$

显然,正电荷所受电场力方向与场强方向相同,负电荷所受电场力方向与场强方向相反。

如图 6.13 所示,将试验电荷 q_0 引入由点电荷 Q 所激发的电场中的某点 P, r 表示 Q 与 P 间的距离, $\boldsymbol{r}_0$ 表示由 Q 指向 P 的单位矢量。根据库仑定律可知, q_0 在 P 点受到的电场力为

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq_0}{r^2}\boldsymbol{r}_0$$

将上式代入式(6.1),可得 P 点处的电场强度

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\boldsymbol{r}_0$$

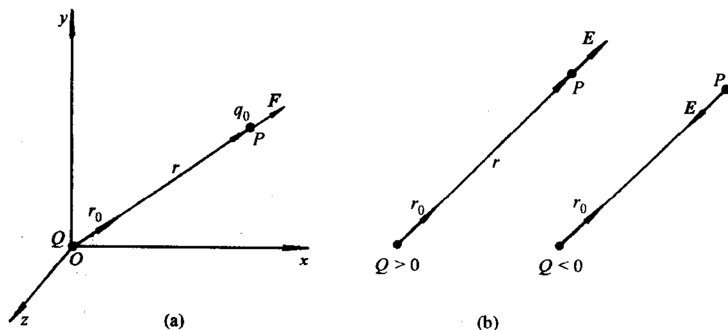


图 6.13　点电荷的电场强度

由于 P 点是任意的,所以上式反映了点电荷电场中电场强度的分布规律。若电场是由若干个点电荷所激发,则根据力的叠加原理得到此时总的电场强度为

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} = \sum\frac{\boldsymbol{F}_i}{q_0} = \sum\frac{\boldsymbol{F}_i}{q_0} = \sum\boldsymbol{E}_i$$

这就是电场强度的叠加原理。

对于任意带电体的电荷分布,从宏观角度来看是连续的,因此可将带电体视为由无限多个点电荷 $\mathrm{d}q$ 组成的点电荷系,这

样就可应用电场强度的叠加原理来计算它的电场强度,即

$$E = \int \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r^2} r_0$$

电场线

为了形象地描述电场中电场强度的分布情况,我们可以在电场中作一些假想的线——电场线(以前称为电力线),来反映电场的特征。为此,对电场线作如下规定:

(1) 电场线上每一点的切线方向与该点电场强度 E 的方向一致。这样,电场线的方向就反映了电场强度方向的分布情况。

(2) 在任一场点,使通过垂直于 E 的单位面积的电场线数目(称电线场密度)正比于该点处电场强度 E 的大小。设通过电场中某点垂直于该点电场强度方向的无限小面元 $dS_\perp$ 的电场线数为 $d\Phi_e$,那么,该点处的电场线密度就是$\frac{d\Phi_e}{dS_\perp}$。按上述规定:

$$E \propto \frac{d\Phi_e}{dS_\perp}$$

在 SI 制中,电场强度的大小 E 等于电场线密度,即

$$E = \frac{d\Phi_e}{dS_\perp} \tag{6.3}$$

于是,电场线的疏密就描述了电场强度大小的分布情况。电场中,电场线稀疏处电场强度小,电场线密集处电场强度大。

电场线只是形象描述电场强度分布的一种手段。电场线实际是不存在的,但借助于实验可将电场线模拟出来。例如在水平玻璃板上撒些细小的石膏晶粒,或在油上浮些草籽,置于电场中,它们就会沿电场线排列。图 6.14 是根据实验模拟结果和关于电场线的规定作出的两种常见的电场线图。从中可以看出电场线有下列基本性质:

(1) 电场线起自正电荷(或来自无穷远处),终止于负电荷

(或伸向无穷远处),不会在没有电荷的地方中断,也不会形成闭合线;

(2) 在没有点电荷的空间里,任何两条场线不会相交。

电场线的这些性质反映了静电场的特征。

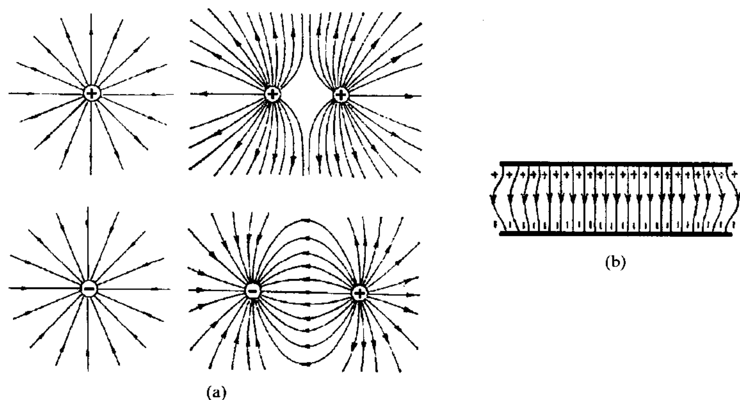


图 6.14 常见的电场线图

式(6.3)可变形为 $d\Phi_e = E dS_\perp$,一般情况下,在电场中某处,面元 dS 与该处的 E 不一定垂直。如图 6.15(b)所示,设 dS 的法线单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 的夹角为 θ,那么 $dS_\perp = dS\cos\theta$,因此有

$$d\Phi_e = E\cos\theta dS \tag{6.4}$$

我们将由式(6.4)决定的物理量 $d\Phi_e$ 称为通过电场中面元

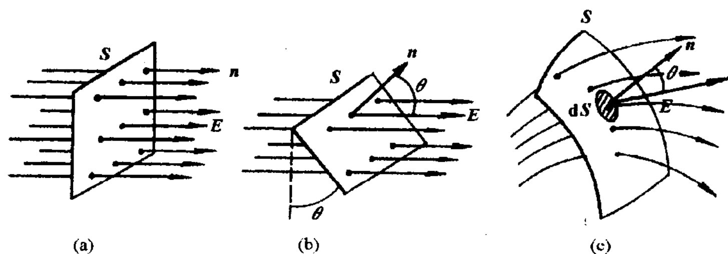


图 6.15 电场强度通量的计算

$\mathrm{d}S$ 的电场强度通量，这样，通过有限面积的通量 Φ_e 等于通过此面积上所有面元的通量之和。在大小上就等于通过这个有限面积的电场线数。对非匀强电场中的任意曲面 S，如图 6.15(c)所示，通过 S 的 $\boldsymbol{E}$ 的通量为

$$\Phi_e = \iint_S \mathrm{d}\Phi_e = \iint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \iint_S E\cos\theta \mathrm{d}S \qquad (6.5)$$

式中 $\iint_S$ 代表对整个曲面 S 取积分。若曲面 S 是一闭合曲面，由于闭合曲面上面元法线单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 的正向总是取自内向外的方向，因此，当有电场线穿过闭合面时，$\boldsymbol{E}$ 通量为正，反之 $\boldsymbol{E}$ 通量为负，若穿入和穿出闭合面的电场线数目相等，则 $\Phi_e = 0$。

1813 年德国数学家高斯通过缜密的运算论证了通过给定闭合面的电场线数与空间电荷之间的关系。在真空中通过任一闭合面的电场强度通量，等于该曲面所包围的所有电荷的代数和除以 ε_0，即

$$\Phi_e = \oiint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \sum \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad (6.6)$$

这就是真空中的高斯定理。



高斯(1771—1855)
德国数学家

根据高斯定理，任一闭合曲面内包围的净电荷(即正负电荷的代数和)不为零而有多余的正电荷时，$\sum q_i > 0$，则 $\Phi_e > 0$，必有电场线从此面穿出；闭合曲面内包围有多余的负电荷时，$\sum q_i < 0$，则 $\Phi_e < 0$，必有电场线从此面穿入。由于此闭合曲面可任意缩小直至趋于零，因此，电场线必起自正电荷(称为场的源头)，又必终止于负电荷(称为场的尾闾)。静电场是一种有源场，高斯定理是静电场的基本规律

之一。

应用高斯定理计算电场强度

在一些特殊情况下，可以利用高斯定理计算电场强度 E，如果能把高斯定理等式左方的积分表达式 $\oiint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 变换成一个包含有电场强度值 E 的代数式，则高斯定理式(6.6)可以写成含有 E 的代数方程，而解此类代数方程求 E 则是轻而易举的事情。作这样的处理，只有在电场分布具有某种对称性时，才有可能。为此，首先要判断能否用高斯定理求解，然后，大体上可按如下步骤进行：

(1) 分析问题中电场强度分布的对称性，明确电场强度 $\boldsymbol{E}$ 的方向和大小分布的特点。

(2) 作合适的高斯面，待求电场强度的场点应该在此高斯面上。一般使高斯面各面元法线单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 或平行或垂直。在 $\boldsymbol{n}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 平行的那部分高斯面上，$\boldsymbol{E}$ 的大小各处要相等，使得 $\boldsymbol{E}$ 有可能提到积分号外。

(3) 计算积分 $\oiint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$。

(4) 算出高斯面包围的电荷代数和 $\sum q_i$。

(5) 按照高斯定理 $\oiint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}S = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i$，代入上面(3)和(4)的结果，写成含有 $\boldsymbol{E}$ 的代数方程，即可求出 $\boldsymbol{E}$。

静电场环路定理

电荷在电场中运动时电场力要作功。下面研究静电场中电场力作功的特点。

如图 6.16 所示，设有一点电荷 q 位于真空中 O 点，一试验电荷 q_0 在 q 所激发的电场中经任意曲线 acb 由 a 点运动到 b 点，电场力所作功为

$$W_{ab} = \int_a^b q_0 \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = q_0 \int_a^b \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = q_0 \int_a^b E\cos\alpha\,\mathrm{d}l$$

式中 α 为 $\boldsymbol{E}$ 与位移元 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 间的夹角。用 r 表示 q_0 运动路径上任意点 c 与 O 点的距离。由图可见，$\mathrm{d}l\cos\alpha=\mathrm{d}r$，又 $E=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{r^2}$，则

$$W_{ab}=\frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0}\int_{r_a}^{r_b}\frac{\mathrm{d}r}{r^2}=\frac{q_0q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_a}-\frac{1}{r_b}\right)$$

式中 r_a、r_b 分别为 q_0 在起点 a 和终点 b 到 O 点的距离。如果 q_0 沿另一条曲线 adb（图 6.16 中虚线）从 a 点运动到 b 点，计算电场力所作的功，将得到上述同样的结果。即点电荷的电场对试验电荷所作的功与路径无关，只与试验电荷所带电荷量以及路径的起点和终点的位置有关。

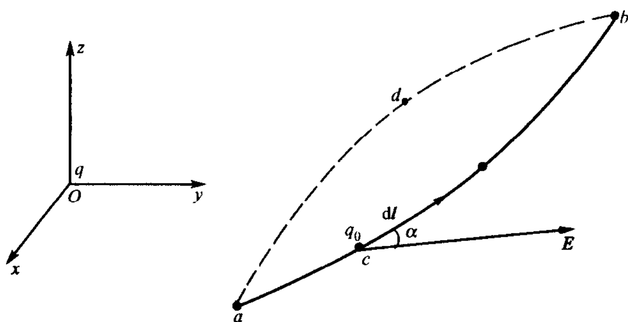


图 6.16 电场力作功

任意带电体系激发的电场可视为点电荷系的合电场。根据电场强度叠加原理和合力功的计算方法，试验电荷在电场中移动时，合电场力对试验电荷所作的功等于各个点电荷的电场力所作功的代数和。由于每一个点电荷的电场力所作的功与路径无关，所以合电场力的功也与路径无关。因此，可得如下结论：试验电荷在任何静电场中移动时，电场力所作的功仅与此试验电荷所带电荷量以及路径的起点和终点的位置有关，而与路径无关。这表明静电场力是保守力。

由上述，试验电荷 q_0 在静电场中从同一起点（如图 6.16 中的 a 点）沿不同路径（adb 或 acb）到达同一终点（如图中 b 点），

电场力作功相等，即

$$q_0\int_{acb}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=q_0\int_{adb}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

且有

$$q_0\int_{adb}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=-q_0\int_{bda}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

即

$$q_0\left(\int_{acb}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}+\int_{bda}\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}\right)=q_0\oint_L\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$$

上式表示，在静电场中电荷 q_0 从点 a 经过一个闭合路径 L 再回到点 a 过程中电场力所作的功恒等于零。

$\oint_L\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 是静电场中电场强度沿闭合曲线 L 的线积分，称为静电场强度的环流。引入电场强度环流这一概念后，静电场力作功与路径无关的特性可等价表述为静电场环路定理：静电场的环流为零。其表达式为

$$\oint_L\boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0 \tag{6.7}$$

静电场环路定理，反映静电场的另一个特性：静电场是保守力场。

在任何保守力场中都可以引入相应的势能，因此，保守力场又被称为有势场。静电场是有势场。在静电场中可引入静电势能的概念，简称电势能。

电势能

一切势能都属于由保守力相联系的系统，电势能是电荷 q_0 与电场 E 之间的相互作用的能量，它是属于电荷 q_0 所在电场 E 的整个系统的（参见图 6.16）。为了方便起见，简单地说成是电荷 q_0 在电场 E 中某点具有电势能。

保守力作功等于相应的势能增量的负值，那么，电场力作功应等于电势能增量的负值。设试验电荷 q_0 在电场 E 中 a 点处的电势能为 $\mathscr{E}_a$，在 b 点处的电势能为 $\mathscr{E}_b$，q_0 从 a 点移到 b 点时，电场力所作的功为 W_{ab}，那么

$$\mathscr{E}_a - \mathscr{E}_b = W_{ab} = q_0\int_a^b \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{6.8}$$

上式只反映了试验电荷 q_0 在电场中 a、b 两点处的电势能之差，它没有确定 q_0 在电场中某一点(例如 a 点和 b 点)的势能的量值。与所有势能一样，要确定一点电荷在电场中某点处电势能的量值，应先选定电势能的零参考点(以下简称零势能点)。零势能点的选取可以是任意的。在理论计算中，对有限带电体系激发的电场，通常取无穷远处为零势能点，这样电荷 q_0 在点 a 的电势能为

$$\mathscr{E}_a = q_0\int_a^\infty \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} \tag{6.9}$$

即电荷在电场中某点处的电势能等于将此电荷从该点移到无穷远处(零势能点)电场力所作的功。

电势能是电场和试验电荷所共有的。如式(6.9)所示，它与试验电荷所带电荷 q_0 成正比，并不能单纯反映场的特性。若取比值 $\mathscr{E}_0/q_0$，显然它与试验电荷 q_0 无关，只与电场本身及电场中的位置有关，将比值 $\mathscr{E}_0/q_0$ 定义为点 a 处的电势 V_a，以此来描述电场的性质，且有

$$V_a = \mathscr{E}_a/q_0 = \int_a^\infty \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

上式表明电场中点 a 的电势等于将单位正电荷从点 a 移至无穷远处(零电势)电场力所作的功。

等势面

前面曾借用假想的电场线来形象地描述电场中的电场强度分布。类似地，可借用假想的等势面来形象地描述电场中的电势分布。

我们把电场中电势相等的点所组成的曲面称为等势面。等势面是一组闭合曲面，它与电场线处处正交。

6.2.2 磁场

磁感应强度

磁现象起源于电荷的运动。实验表明，运动电荷之间除了

有电场力相互作用外,还存在另一种被称为磁力的相互作用。运动电荷不仅在其周围空间激发电场,同时还在周围空间激发磁场。磁场与电场一样也是物质存在的一种形式。无论是运动电荷之间,或电流之间,或电流(包括运动电荷)与磁体之间,磁的相互作用都是通过磁场来实现的。

这里,我们可以仿照电场中引入电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$ 来描述电场性质一样,在磁场中引入磁感应强度矢量 $\boldsymbol{B}$ 来描述磁场的性质。为此我们从磁场对运动电荷的作用力来引出磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的定义。

实验表明,一带电粒子 q 以速度 v 进入磁场,运动电荷所受的磁场力不仅与电荷的多少有关,而且还与电荷运动速度的大小和方向有关。当电荷运动速度 v 的方向与某一特定方向平行(可反平行)时,电荷不受磁场力的作用。电荷 q 以不同于上述特定方向的速度 v 通过磁场中某点时,它所受的磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的方向总是垂直于 v 与该特定方向组成的平面,而 $\boldsymbol{F}$ 的值则与 q 与 v 的乘积成正比,改变电荷的符号,则磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的方向反向。当电荷速度 v 的方向与上述特定方向垂直时,作用于电荷的磁场力 $\boldsymbol{F}$ 的值最大,即 $F_{\max}=F_{\perp}$。

按照以上实验结果,我们将运动电荷 q 在空间某点处所受的最大磁场力$F_{\perp}$与电荷量 q 和运动速度的乘积qv 之比规定为磁场中该点的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的大小,即

$$B=F_{\perp}/qv$$

该点磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的方向可以由小磁针放在该点时,其 N 极所指的方向来确定。

在 SI 国际单位制中 $\boldsymbol{B}$ 的单位是特[斯拉],符号为 T。

磁通量

为了形象地描述磁场中磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的分布,依照电场中引入电场线的方法,在磁场中引入磁感应线(简称 B 线),并作如下规定:

(1) 磁感应线上任一点的切线方向为该点磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的

方向。

(2) 按 $\boldsymbol{B}$ 的大小来确定磁感应线的疏密。令通过垂直于 $\boldsymbol{B}$ 的单位面积的磁感应线的条数等于该处 $\boldsymbol{B}$ 的大小。取与 $\boldsymbol{B}$ 垂直的面元 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}_{\perp}$，用 $\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}$ 表示通过此面元的磁感应线的数目，那么，该处 $\boldsymbol{B}$ 的大小为

$$B=\frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}S_{\perp}} \tag{6.10}$$

上式可写成 $\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}=B\mathrm{d}S_{\perp}$。如图 6.17 所示，若在磁场中某处，面元 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 的法线单位矢量 $\boldsymbol{n}$ 与该处 $\boldsymbol{B}$ 的夹角为 θ，那么

$$\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}=B\cos\theta\mathrm{d}S=\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

$\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}$ 称为通过面元 $\mathrm{d}S$ 的磁感应通量，简称磁通量或 $\boldsymbol{B}$ 通量。

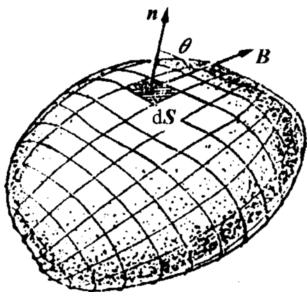


图 6.17　磁通量

磁通量 $\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}$ 在大小上等于通过面元 $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$ 的 $\boldsymbol{B}$ 线数。在国际单位制中，磁通量的单位是韦[伯]，符号为 Wb。

通过有限面积的磁通量 Φ_{m} 等于通过此面积上所有面元的磁通量之和，即

$$\Phi_{\mathrm{m}}=\int_{S}\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}=\int_{S}\boldsymbol{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{6.11}$$

通过有限面积的磁通量，在大小上等于通过此面积的 $\boldsymbol{B}$ 线数。

磁感应线只是形象描述磁场中 $\boldsymbol{B}$ 分布的一种手段，实际上它是不存在的，但可以借助实验方法把它模拟出来。例如在水平玻璃板上撒些细铁屑，放在磁场中，它们就会沿 $\boldsymbol{B}$ 线排列起来。实验结果表明，磁场中的 $\boldsymbol{B}$ 线都自成闭合曲线，没有起点也没有终点。

磁场的高斯定理

由于磁感应线是无始无终的闭合线，所以，对磁场中的任一闭合曲面来说，有多少条 $\boldsymbol{B}$ 线穿入曲面，就必须有同样条数的

B 线穿出曲面。所以穿过任意闭合曲面的磁通量恒等于零，把这个结论叫做磁场的高斯定理，即

$$\oiint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \tag{6.12}$$

由磁场的高斯定理可知，磁场与静电场不同。静电场的高斯定理指出，通过任意闭合曲面的电通量可以不为零，电场线始于正电荷，止于负电荷，是不闭合的，反映了静电场是有源场。但通过任意闭合曲面的磁通量必为零，磁感应线是闭合的，反映了磁场是无源场。

毕奥-萨伐尔定律

恒定电流的磁场称稳恒磁场，在计算磁场中的磁感应强度时，可依照在求带电体电场中的电场强度的方法。如图6.18所示，先将载流导线分割成许多线元矢量 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$，将元量 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 与流过的电流 I 的乘积 $I\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 叫做电流元，这样载流导线的磁场可视为许多电流元激发的磁场的叠加。法国科学家毕奥和萨伐尔在实验的基础上，由拉普拉斯经科学抽象得到了电流元在周围空间激发的磁场中的磁感应强度的表达式为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{r}}{r^3}$$

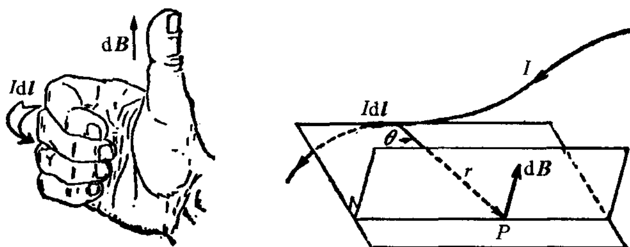


图6.18　电流元的磁感强度的方向

这就是毕奥-萨伐尔定律。式中 $\boldsymbol{r}$ 是电流元到所研究场点的径矢，μ_0 是真空中的磁导率，且有 $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}(\mathrm{T\cdot m\cdot A^{-1}})$。这样，任意载流导线磁场中的磁感应强度为

$$B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{r}}{r^3}$$

稳恒磁场中的环路定理

6.2.1节中曾分析了静电场的环路定理，从一个侧面阐明了电场性质，同样，我们来分析稳恒磁场中磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的环流，从而探讨磁场的性质。

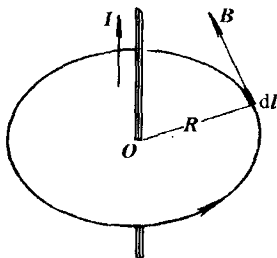


图6.19 无限长载流导线 $\boldsymbol{B}$ 的环流

先分析真空中无限长载流直导线周围磁场的情况(图6.19)。根据毕奥-萨伐尔定律可知导线周围磁场中的磁感应线是中心在导线上的垂直于导线的一系列同心圆，半径为 R 的磁感应线上各点 B 的大小均为 $\mu_0 I/2\pi R$。若取一条磁感应线为积分路径，计算 B 的环流，有

$$\oint_L \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \oint_L B dl = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi R} dl$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \oint_L dl = \mu_0 I \qquad (6.13)$$

式中 L 是磁场中的任意闭合路径，I 是路径所包围的电流的代数和。可以证明，上式结果对任何稳恒磁场都成立。由此得到真空中磁场的安培环路定理，即磁场中磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 沿任何闭合路径的环流，等于此闭合曲线所包围的传导电流的代数和的 μ_0 倍，即

$$\oint_L \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 \sum_i I_i \qquad (6.14)$$

式中电流的正、负由电流流向和路径绕行方向决定。当它们符合右手螺旋时取正值，反之，符合左手螺旋时则取负值。当闭合路径内不包围电流时，$\boldsymbol{B}$ 的环流为零。

$\boldsymbol{B}$ 的环流一般不为零的特征，表明磁场不是保守力场。环流不等于零的场称有旋场，因此稳恒磁场是有旋场。

利用安培环路定理，可以较方便地计算具有对称性电流分布的磁场中的磁感应强度。

6.3 电磁感应与电磁波

前面我们简单地叙述了静止电荷产生电场和稳恒电流产生磁场的一些现象以及电磁学发展史上的一些有名的实验，下面将介绍电与磁间密切相关的一些物理现象和规律。

6.3.1 电磁感应基本定律

这里，我们先再叙述一下法拉第发现的电磁感应现象。

如图 6.20 所示，一线圈 A 与灵敏电流计 G 联成回路，用一磁铁 N 极或 S 极插入线圈或抽出时，电流计指示回路中有电流通过。电流的方向与磁铁的极性及运动方向有关。电流的大小则与磁铁相对于线圈运动的快慢有关，磁铁运动得越快，电流愈大；磁铁运动得越慢，电流愈小；磁铁停止运动，则电流为零。

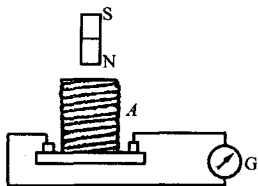


图 6.20　磁铁插入线圈回路中有电流通过

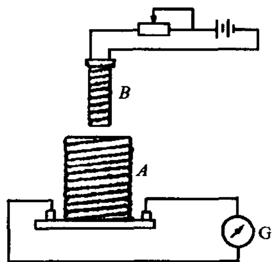


图 6.21　两线圈之间有相对运动，线圈回路中有电流通过

如果磁铁静止不动，将线圈相对于磁铁运动，所得结果与上述完全相同。如果将磁铁换成另一载流线圈 B（如图 6.21），则发现，只要线圈 B 和线圈 A 之间有相对运动，所得结果也与上述完全一样。不仅如此，我们还发现，即使线圈 A 与 B 之间没

有相对运动，只要改变线圈 B 中的电流强度，或者甚至电流强度也不变化，只是改变线圈 B 中的介质(例如将一铁棒插入线圈 B 或从线圈 B 中抽出)，同样在线圈 A 的回路中引起电流。

以上各个实验的条件似乎很不相同，但是仔细分析可以发现，它们有一个共同点，即当线圈 A 所在空间的磁感应强度发生变化时，线圈 A 中就有电流通过，这个电流称为感应电流。而且，磁感应强度变化越迅速，感应电流也越大，感应电流的方向根据磁场变化的具体情况来决定，那么，磁场变化是否就是产生感应电流的惟一起因呢？通过实验我们还发现另一种情况，如图6.22所示。在一均匀磁场中放一矩形线框，线框的一边 CD 可以在 AD、BC 两条边上滑动，线框的另一边 AB 中接一灵敏电流计 G，线框平面与磁场垂直。当 CD 边滑动时，矩形线框中也有感应电流产生，滑动速度愈快，感应电流愈大。感应电流的方向与磁场方向及 CD 滑动的方向有关。但如果线框平面平行于磁场方向，则无论怎样滑动 CD 边，矩形线框中都没有感应电流产生。在这个实验中，磁场没有发生变化，但当 CD 边滑动，使得通过线框的磁通量发生变化时，也会产生感应电流。进一步分析前面的那几个实验也可以看出，那几个实验中磁场的变化事实上也必然引起通过线圈的磁通量的变化。因此，可将上述实验事实归纳为：只要通过闭合回路的磁通量发生变化，就会在回路中产生感应电流。这种由于磁通量发生变化而产生电流的现象，称为电磁感应现象。

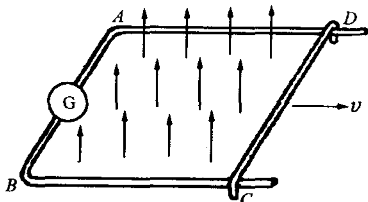


图 6.22　线框边滑动时回路有电流通过

回路中出现感应电流，说明回路中必有电动势存在。这种由电磁感应所产生的电动势，称为感应电动势。如果改变闭合回路的总电阻，而其他条件保持不变，重复前面所讲的实验，则

感应电流将发生相应的变化，电阻增加电流减少，电阻减少电流增加，但感应电动势却不随回路的阻值而变。这说明磁通量的变化在回路中直接产生的是感应电动势，而不是感应电流。也就是说，与感应电流相比，感应电动势是更本质的东西。

通过对大量实验结果的分析，物理学家得到如下的基本定律：回路中所产生的感应电动势 $\mathscr{E}$ 的大小与穿过回路的磁通量对时间的变化率 $\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t}$ 的大小成正比，即

$$\mathscr{E} \propto \frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t}$$

写成等式有

$$\mathscr{E} = -k\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t}$$

这就是法拉第电磁感应定律。式中负号表示感应电动势的方向总是对抗磁通量的变化。比例系数 k 的值则与单位的选择有关，在国际单位制中，取比例系数 $k=1$，于是法拉第电磁感应定律可表示为

$$\mathscr{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t}$$

6.3.2 动生电动势与感生电动势

由上节的讨论可以看到，回路中磁通量发生变化时会产生感应电动势。而磁通量发生变化的原因可以归纳为两种：一是磁场不变而导体运动，二是导体不动而磁场变化。由前一种原因所产生的感应电动势称为动生电动势，由后一种原因所产生的感应电动势称为感生电动势。为了对电磁感应现象有更深刻的了解，这一节我们将进一步分析这两种电动势。

如上节所讨论的情况，磁场不变，仅仅由 CD 边的运动引起的磁通量的变化而在回路中产生的感应电动势，即为动生电动势。显然，因为线框的其他各边都不动，感应电动势只可能在 CD 边上产生，这就相当于一段长为 l 的直导线，在磁场中以垂

直于 $\boldsymbol{B}$ 方向的速度 v 向右运动的情况，如图 6.23 所示。这时导线中的自由电子也以速度 v 跟随导线一起向右运动，由此电子受到的作用力遵循洛伦兹力公式：

$$\boldsymbol{f} = -e\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

式中 $-e$ 表示电子所带电量。力 $\boldsymbol{f}$ 的方向由图 6.23 中的 C 指向 D，在这个力推动下，自由电子将沿着导线由 C 向 D 移动。

如果 C 与 D 之间没有其他导线相连，自由电子运动的结果将是 D 端出现负电荷的堆积，C 端出现正电荷的堆积。但这个过程不会无限制地进行下去，因为随着导体两端电荷的堆积，将在导体中产生静电场 $\boldsymbol{E}$，$\boldsymbol{E}$ 的方向由 C 指向 D，于是，电子除了受到向下的磁力作用之外，还要受到向上的静电力 $e\boldsymbol{E}$ 的作用。当两端电荷积累到一定程度时，这两个力达到平衡，导体中的电子不再因导体的运动而发生宏观转移。

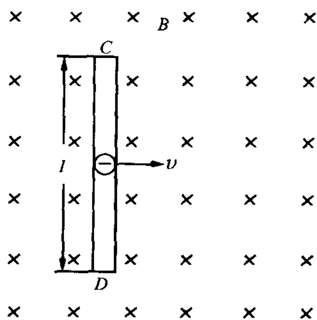


图 6.23　运动导线中电子受到的磁场力

这时导体两端有一定的电势差，C 端为正，D 端为负。如果用另外的导体将 C、D 两端连接起来，例如，像图 6.22 中的线框 $DABC$ 那样，由于 C 端电势比 D 端高，自由电子在静电力推动下将沿着 $DABC$ 运动，相当于电流沿 $CBAD$ 方向流过，于是 C、D 两端所积累的电荷将要减少，原来的平衡被破坏。这时磁场力不断地使自由电子从 C 端在运动着的导线内部流向 D 端，使 C、D 两端电荷不断得到补充，两端电势差保持一定的值。这样，也就不断地有电流在回路中通过。

由以上的分析可以看出，运动导线 CD 就相当于一个电源，C 端为电源正极，D 端为电源负极。而电源的电动势等于在将单位正电荷从电源负极通过电源内部移动到正极的过程中，非

静电作用所作的功。现在电源中的非静电作用即磁场力，而作用于单位正电荷的磁场力等于电场强度

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{f}}{-e}=\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$$

因此，电动势等于

$$\mathscr{E}=\int_D^C\boldsymbol{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int_D^C(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}$$

式中 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 表示将正电荷由 D 移到 C 的过程中的一小段位移，因为在图 6.23 的情况下，$\boldsymbol{v}\perp\boldsymbol{B}$，并且 $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$ 的方向与 $\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ 的方向一致。所以上面的积分等于 $\mathscr{E}=\int_D^C(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=\int_D^C vB\mathrm{d}l=Blv$，这个结果与通过回路磁通量变化率计算的结果相同。由以上的讨论可见，动生电动势并不是一种新的现象，它是由运动电荷在磁场中受到磁场力的作用所引起的。由上式可知，只有在运动的导体上才有可能产生电动势，而且动生电动势的大小不仅与导体相对于磁场的运动速度 v 的大小有关，还与 $\boldsymbol{v}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 之间的夹角有关，当 $\boldsymbol{v}\,/\!/\,\boldsymbol{B}$ 时，$\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}=0$，即动生电动势为零。这就是说，只有当导线作“切割”磁力线的运动时，才产生动生电动势。

如前所述，导体不动而磁场变化时，在回路中也会产生感生电动势。感生电动势与动生电动势之区别为，感生电动势的产生仅由磁场本身变化引起，而与其他因素无关。麦克斯韦分析了这个事实，提出了他的看法，他认为实质性的问题在于：变化的磁场在闭合导线中激发了一种电场，这种电场称为感生电场。感生电流的产生是这一电场作用于导体中自由电荷的结果，同时他对此加以推广，认为不管有无导体回路存在，变化的磁场总是在空间激发电场。我们要注意到，法拉第建立的电磁感应定律是对导体组成的回路讲的，而麦克斯韦假说则不管是否有导体，不管是真空或介质，都是适用的。也就是说，如果有导体存在时，由于感生电场的作用，便驱使导体中的自由电荷运动，从而显示出感应电流；如果无导体存在时，就没有感应电流，但是

变化的磁场所激发的电场还是客观存在的。这个假说现已被近代科学实验所证实。例如，电子感应加速器的基本原理，就是用变化的磁场所激发的电场来加速电子的，它的出现无疑是为感生电场的客观存在提供了一个令人信服的证据。

麦克斯韦通过对电磁感应现象的分析，提出了存在感生电场之概念。这种电场，不是由电荷所产生的，而是由变化的磁场所产生的。

按照电、磁的对称性，1861年麦克斯韦进一步提出：既然变化的磁场会引起感生电场，那么，变化的电场也会引起感生磁场。

在此之前，人们知道电流会产生磁场，而这种电流是电荷传导而形成的。因此，通常导体中的电流称为传导电流。现在，变化的电场也会引起感生磁场，而变化的电场其作用等效于传导电流，但由于它并不是真正的电荷传导而形成的电流，故称之为位移电流。

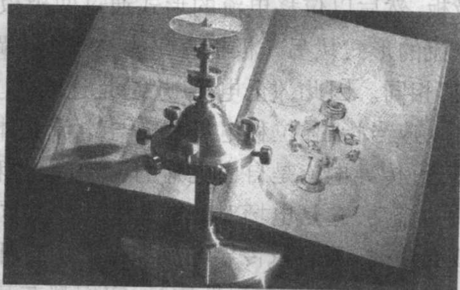
这样一来，就有两种电流可以产生磁场，一种是传导电流，一种是位移电流，传导电流和位移电流的总和被称为全电流。

下面，以 L、R、C 充放电电路为例，进一步具体说明位移电流的概念。

如图6.24所示，电源通过 L、R 向平行板电容器充电，然



克斯韦(1831—1879)
英国物理学家



麦克斯韦设计的
动力学流旋装置

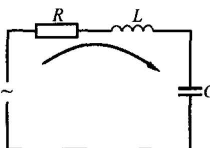


图 6.24　RLC 电路

后放电。从图中可以看到，传导电流在电容器两极板之间中断了，但是，此时极板间电场强度为

$$E=\frac{q}{\varepsilon_0 S}$$

式中：q 表示两极板上所带自由电荷的电量；S 是极板的面积；ε_0 为真空中的电容率。在充、放电过程中，q 随时间变化，因此极板间的电场亦随时间变化。上式两边分别对时间求导数，有

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{S}\frac{\mathrm{d}q}{\varepsilon_0\mathrm{d}t}=\frac{I}{\varepsilon_0 S}=\frac{j}{\varepsilon_0}$$

上式表示，在电容器极板间虽然不存在自由电荷移动而形成的传导电流，但是在电容器极板间却有一个变化的电场，其电场对时间的变化率等于电容器两极板上传导电流密度 j。这种电场强度对时间的变化率，即位移电流密度为

$$\boldsymbol{j}_{位}=\varepsilon_0\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{E}}{\mathrm{d}t}$$

在引进位移电流的概念之后，非稳恒电流通过电容器的过程可以这样来理解：电流以传导电流的形式流入电容器的一个极板，然后以位移电流的形式通过两极板之间的空间，再以传导电流的形式从另一极板流出。在整个电路中，各个截面的“全电流”相同。因此，“全电流”永远是连续的。

应当指出，位移电流和传导电流是本质上不同的两个物理概念，传导电流是自由电荷的流动，而位移电流其实根本不是电荷的流动，它是电场对时间的变化率。同时，位移电流通过空间或介质时，不会像传导电流那样产生焦耳热。可见，位移电流和传导电流的惟一共同性质是，它们都在其周围空间激发磁场，所以，麦克斯韦关于位移电流假说的中心思想就是：变化着的电场将要激发感生磁场。下面我们将要看到，这正是形成电磁波的必要条件之一。而实验证实了电磁波的存在，这就为位移电流

的假说提供了有力的证据。

6.3.3 电磁场方程与电磁波

根据电磁学现象的经验规律(库仑定律、安培定律、电磁感应定律、磁荷不存在)及位移电流及其能激发感生磁场的基本假设,再应用矢量分析的数学手段,麦克斯韦得出了在真空中的电磁场方程组(积分形式):

$$\oiint_S \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \iiint_V \frac{\rho}{\varepsilon_0}\mathrm{d}V \qquad \text{(高斯定律)}$$

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \qquad \text{(法拉第电磁感应定律)}$$

$$\oiint_S \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \qquad \text{(高斯定律)}$$

$$\oint_L \boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_S \mu_0 \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} + \varepsilon_0\mu_0\int_S \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \qquad \text{(安培定律)}$$

其中:ρ 为电荷密度;j 为传导电流密度;ε_0 为真空介电常数;μ_0 为真空磁导率。

应用上述方程组,加上 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 所应满足的边界条件和初始条件,就可以确定空间某点在某一时刻的电磁场,它们包括了静电场、稳恒电流和似稳电磁场等特殊情况。所以,麦克斯韦方程组以数学的形式概括了电磁场的基本规律,同时,为解决各种实际问题奠定了基础。

麦克斯韦关于存在感生电场及位移电流的假设也就是,变化的磁场会引起变化的电场,变化的电场又会引起变化的磁场,由近及远,继续下去,电磁场在空间以一定速度传播,就形成了电磁波。

麦克斯韦的电磁理论刚问世时,并没有立即在物理学界中得到承认,一些杰出的物理学家像亥姆霍兹和玻尔兹曼等也经过好几年才认识到它的意义并支持了它。由于麦克斯韦不只是单纯总结前人的实验规律,而是作了补充和推广,因此他的理论

是否正确，仍然是个问题，当然它只能通过实验才能解决。1879年，亥姆霍兹为柏林大学出的物理悬赏题就有这个意义，他的学生赫兹参加竞赛获胜而得金质奖章。后来柏林科学院又根据亥姆霍兹的建议，悬赏征求“用实验确定电磁作用与介质极化之间的关系。”他建议赫兹去解决这个问题，但赫兹经过计算感到，采用当时的实验设备，无法产生解决这个问题所必需的快速电磁振荡，可又想不出新办法，只好作罢。但是这个问题一直在赫兹的心里。1884年，赫兹从理论上研究了麦克斯韦的电磁理论后，又想到用实验验证这个理论问题。


赫兹(1857—1894)
德国物理学家

1885年秋，赫兹到卡鲁斯尔高等学校当教授，这个学校设备较好，为他的研究工作提供了方便。1886年，他在作放电实验时，注意到一个现象：用一弯成长方形的铜钱(两端间有一个很小间隙)构成一个开路，用一条导线把这开路连接到正在由感应线圈激发而作火花放电的回路上，间隙中会有火花出现；接到回路上任何一点，间隙中都有火花出现；而且不接到回路上，也有火花出现。他理解到这是电磁振荡的共振现象(谐振现象)，是开路的固有频率等于放电回路的固有频率所致。

随后，赫兹设计了一个振荡电路，如图6.25所示，这个振荡电路包括两个金属放电杆，每根杆的一个端安装一金属球，当将感应线圈副线圈之几千伏的变电压加在两金属球上时，在两球之间产生火花放电。与此同时，在其周围空间就伴随着电磁波的发生与传播。

这个电磁波发生器，实际上相当于一个敞开的振荡电路，其

等效性如图 6.26 所示。

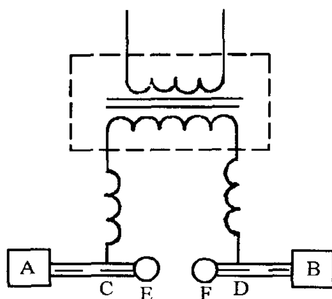


图 6.25 赫兹设计的电磁波发生器

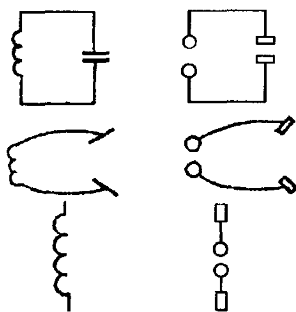


图 6.26 电磁波发生器的等效性说明

赫兹还设计了一个检波器,用以检验电磁波的存在。这个所谓的检波器很简单:将一条导线弯成圆形,在导线的两端焊上两个小球(图 6.27)。这个装置,实际上是一个未完全敞开的振

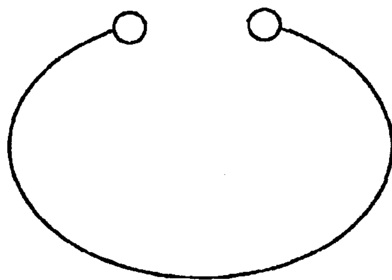


图 6.27 电磁波检波器

荡电路,它的固有振荡频率是由它的电容和电感决定的。当电磁波到达这个振荡电路时,检波器的导线上就产生感生电动势。若调节两球间距离,即改变它们之间的电容,则检波器的固有频率随之改变。当这频率与外来电磁波的频率相同时,就发生谐振,在两球的间隙出现火花,因而能检验电磁波的存在。

赫兹又用一些方法证明了电磁波和光波一样,可以发生反

射、折射、干涉和偏振，这就证明了电磁波与光波的相同性，并为光的电磁理论确立了实验基础。以下是对电磁波理论的一些总结：

(1) 按照麦克斯韦电磁理论，可以这样来理解变化的电磁场在空间的传播：设在空间某一区域中的电场发生了变化，在它邻近的区域就会产生变化的磁场。这个变化的磁场又要在较远的区域产生变化的电场，从而又在更远的区域产生变化的磁场，如此继续下去，变化的电场和变化的磁场不断地相互交替变化，并且由近及远地传播出去，这就是电磁波的传播。

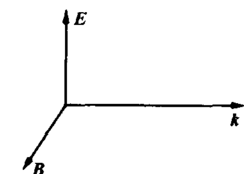


图 6.28　电磁波的横波性

(2) 电磁波的传播过程中，电场 $\boldsymbol{E}$、磁场 $\boldsymbol{B}$ 的振动方向和电磁波传播方向 $\boldsymbol{k}$ 相互垂直，如图 6.28 所示。故电磁波是一种横波。

(3) 电磁波方程中的 v，根据推算可得

$$v=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$

把 $\varepsilon_0=8.854\times10^{-12}\mathrm{F\cdot m^{-1}}$，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\mathrm{H\cdot m^{-1}}$代入上式计算，得到

$$v=2.998\times10^8\mathrm{m\cdot s^{-1}}$$

这恰好与实验测得的光在真空中的传播速度 c 相等（在误差范围之内）。这是电磁波与光具有同一性的一个重要证明。

(4) 理论计算给出，在传播过程中，对于同一地点，电场强度 $\boldsymbol{E}$ 与磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 是成比例的，有如下关系：

$$\sqrt{\varepsilon_0}\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{B}}{\sqrt{\mu_0}}$$

(5) 电磁波的传播过程，也就是电磁场能量的传播过程，可以证明，电磁场的能量

$$W=\frac{1}{2}\int_V\left(\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2+\frac{\boldsymbol{B}^2}{\mu_0}\right)\mathrm{d}V$$

其能量密度(单位体积内的电磁场能量)为

$$w=\frac{1}{2}\left(\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2+\frac{\boldsymbol{B}^2}{\mu_0}\right)$$

其能流密度(即每单位时间内,通过垂直于传播方向的单位面积的能量)为

$$S=w\cdot c=\frac{c}{2}\left(\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2+\frac{\boldsymbol{B}^2}{\mu_0}\right)$$

因 $\sqrt{\varepsilon_0}\boldsymbol{E}=\boldsymbol{B}/\sqrt{\mu_0}$ 及 $c=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$,则有

$$S=\frac{\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{B}}{\mu_0}=EH$$

其中 $H=B/\mu_0$,为磁场强度。

现在已知,无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等都是电磁波,但它们的频率(或波长)不同。为了便于比较,可以按照它们的波长(或频率)的大小,把它们依次排成一个谱,这个谱叫做电磁波谱(图 6.29)。

在电磁波谱中,波长最长的是无线电波。无线电波因波长的不同又分为长波、短波、超短波和微波等。长波主要用于远洋长距离通信;中波多用于航海和航空定向以及一般无线电广播;短波多用于无线电广播、电报通讯;超短波、微波多用于电视、雷达、无线电导航等。

其次是红外线、可见光和紫外线,这三部分合称光辐射,在所有的电磁波中,人眼可以看到的只有可见光。可见光的波长约在 0.76μm 到 0.40μm 之间,仅占电磁波中很小的一部分,再次是 X 射线,波长最短的电磁波是 γ 射线。

各种不同频率的电磁波,它们的共同之处就像水波、声波的共同之处一样,都遵守有关振动与波动的规律性(在前面已作过论述);它们的不同之处在于它们与物质相互作用时所表现的情况不一样。例如,X 射线、γ 射线具有很强的贯穿、电离能力,而无线电波则容易被反射或吸收。在技术上,我们利用不同频率电磁波与物质相互作用的特性来达到不同的应用目的。

在电磁波谱中,可见光是人类认识最早的一种物质形态,除

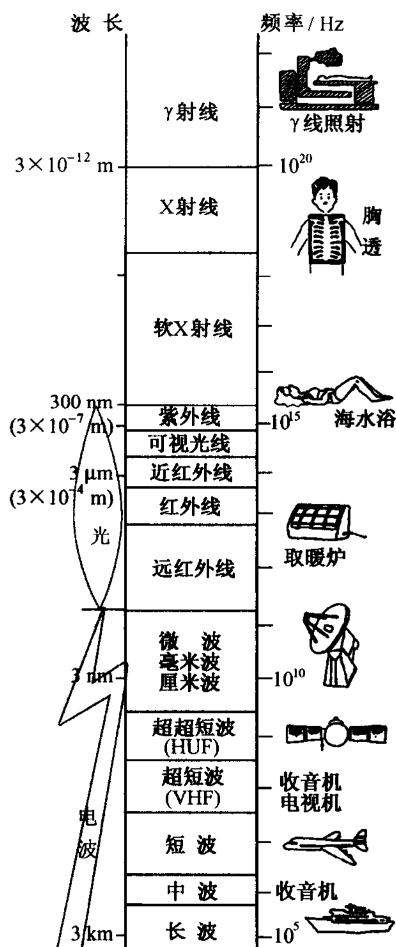


图 6.29

了水波、声波之外,光是人类最早认识的一种波动形态。像水波、声波一样,光波具有干涉、衍射等特性。

6.3.4 作为物质一种形态的电磁场

在法拉第-麦克斯韦的电磁场理论中,电磁场还不是独立的

物质，它要依赖一种叫做"以太"的物质来存在。但是，后来的科学证实了电磁场是作为一种独立的物质实体而存在的。

承认场是物质存在的一种形式，是有一定困难的，这种困难又是有一定历史原因的。在历史上，物质概念很长时间以来是与所谓"实物"概念（原子、分子及其所组成的物体）联系在一起的。这种实物具有较大的质量密度与能量密度，集中在空间的一定位置上出现，它所占据的空间，别的物体就不可能再去占据了。而电磁场则不具有以上的特征，它具有极大的弥散性、极小的质量密度与能量密度，场所占据的空间，别的场和实物又都可以随便侵入（场的叠加原理就是这种特性的一个表现）。

确实，电磁场与实物之间存在着一些差异，但是，有许多更为基本的特征表现出电磁场与实物之间的相似同一性，具体表现如下：

（1）场具有能量

由电磁场的场方程，可导出场的能量表达式为

$$\boldsymbol{W} = \frac{1}{2}\int_V \left(\varepsilon_0 \boldsymbol{E}^2 + \frac{1}{\mu_0}\boldsymbol{B}^2 \right) \mathrm{d}V$$

电磁场具有能量是电磁场具有物质实在性的重要证明，这说明电磁场不是什么"虚空"，而是像实物一样具有可作功的能量。与实物之区别，仅在于量上的不同——能量密度极小而已。

（2）场具有动量

根据电磁场方程，电磁场不仅具有能量，而且具有动量

$$G = \frac{1}{c^2}\int_V \left(\boldsymbol{E} \times \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0} \right) \mathrm{d}V$$

根据电磁场具有场动量的性质，可以导出光射到物体表面会产生光压：

$$p = \frac{u}{c}(1 + \rho)$$

其中：u 代表光的能流密度；ρ 代表物体的反射系数。

光压的存在，在 1901 年已为列别捷夫用实验证实。

（3）场具有质量

在实物的物质概念中，质量是物质的一个基本特征。那么，电磁场有没有质量呢？光压存在的实验可以证明电磁场是有质量的。另外根据爱因斯坦1905年所导出的质能关系式

$$E = mc^2$$

亦可以知道，电磁场有质量，其值为

$$m = \frac{1}{2c^2}\int_V\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0}B^2\right)\mathrm{d}V$$

所不同的是，电磁场的量子——光子的静止质量为零，而实物粒子——电子、中子、质子的静止质量不为零。

（4）在微观条件下，场与实物都具有二象性，且可以相互转化

在宏观条件下，场与实物的区别还是比较显著的，以致在很长的时间，场的物理理论（物质结构的连续图景）与实物的物理理论（物质结构的分立图景）是平行发展、各自独立的。但是随着人类对物质结构的认识从宏观向微观深化，人们发现它们愈来愈多的共同性质。如电磁场除波动性外，也具有粒子性；而电子、质子等除具有粒子性外，也具有波动性。场与实物都具有二象性。另外，在一定条件下，场粒子与实物粒子会发生相互转化。

第七讲　信息科学的进步

7.1　电子工程发展的新潮流

麦克斯韦预言了电磁波的存在和电磁波的空间传播，这为信息科学的进步奠定了基础，赫兹实验的成功为信息科学的发展从理论走向应用迈开了关键的一步。然而，若是缺少了电子元器件的发展，那信息科学的发展只能是空中楼阁，成为无源之水，无本之木。最初是依赖于"硕大"的真空电子管的工作来完成的，自从晶体管和集成电路被发明以来，信息科学就得到异常迅猛的发展。1965 年英特尔公司创始人之一的摩尔在研究集成电路发展时发现半导体集成电路中单位面积上的晶体管数大约是以每年(后修正为 18 个月)增加一倍，其运行速度也增加一倍。例如：1965 年单位面积上是 64 个，则到了 1999 年就达到 800 万个了，这就是所谓的摩尔定律，摩尔定律不是物理定律，它是以客观基础结合主观臆想而总结出来的经济学规律。但随着器件特征尺寸的降低，当其低于 100nm 时，微电子技术将逐渐接近其物理极限，不能再小下去了，在这个情况下，原有的专利和技术就不能满足电子工程发展的要求，迫切需要新的知识、工艺和专利来替代了。在 1999 年的国际电子器件会议提出要以微加工中的三大问题(光刻、晶体管单元、配线三大技术)所面临的困难为奋斗目标，生产出 100nm 数字存储器，并力争在始于 2001 年的 ITRS Road mpa 15 年计划之最后一年的 2014 年达到间距为 35nm。由于微电子的发展使得微型电脑逐渐升级，过去"硕大"无比的真空管、晶体管电子计算机现在已经缩小到成为台式、掌上式了，这又带来了一系列根本性的变革。进入新世纪后，原来属于领先地位的电脑、个人电脑技术则又逐渐让位

于互联网技术了，手机、DVD、游戏机、设置终端、车载电脑、数字电视等所有的信息设备都和互联网相连了，电子工业的企业的组织形式也相应改变了。LSI（超大规模集成电路）的大型企业厂商也都纷纷由ASIC、微处理机、存储器等通用制品的生产转向到手机制造，生产数字化、网络化产品的方向了，通过技术合作的道路来进行企业重组，在元器件的发展上对互联网的基本设备也力求做到高速化，低功耗，采用数字存储和模拟混用的系统以超大规模集成。在互联网电信系统上，也力求功能齐全；而移动通信设备也要求低功耗，低成本化；数码相机、手机的需求，CD、数码音响系统、数码唱机等在市场的销售正在扩大。另外，多媒体技术的应用和低成本化，正受到人们的注目。与音乐配送的动画相关连的应用软件更是有较大的市场前景。

我国集成电路产业起步于1965年。从80年代开始，国家先后在无锡和上海建设了芯片研发和生产基地。我国从1980年到1999年，对集成电路产业的总投入为257亿元，其中包括126亿元的外资投入。2000年我国集成电路产业在全球只占1%的份额，即使“十五”期间各个计划项目都能如期实施，到2005年也只占到2%～3%，到2010年也至多占5%。对低起点增长的中国来说，要成为全球集成电路制造的基地，路还很长。

一般而言，从研发到生产其周期为17年，近年来美国研发的产品，往往交给其他地区去生产、加工，我国的台湾是国际上一个突出的加工点。因此，我国台湾地区在微电子工业的生产制造技术上在世界上是占有一定地位的，其LSI工厂所设计的180～150nm的设计流水线产品已经扩大生产，据2002年年初的报道，他们已在300mm芯片上成功做出100nm的产品了，这比起美国用最先进的生产过程只能得150nm的产品来说应属是世界一流的了。目前国内仍以350nm技术为主，但也有几家已经在生产250nm甚至180nm的产品了。

在尖端技术的器件研究方面，Si基上的量子元件和

MOSFET集成，单分子器件，分子识别器件，光、生物、量子、电子计算机等都在广泛研究，向柱状 Si 方面应用的准备也确实进了一步。对于信息科学的进步，本讲只集中于与我们日常生活息息相关的几个重要内容：个人计算机（微机），互联网和网络化的潮流，以及网络与当今社会相关联的问题，其他问题则不一一介绍。

所谓的计算机是由电子器件及相关设备和系统软件组成的自动计算系统。现代电子计算机可完成算术运算、逻辑操作、数据处理、符号处理、图像处理、图形处理、文字处理、逻辑推理等功能，它的用途非常广泛，目前几乎所有的行业和领域都在使用计算机。根据数的表示方式和计算原理的不同，电子计算机通常分为数字计算机和模拟计算机两大类，这两类计算机的根本差别在于前者是对离散形式表示的数进行操作，而后者是对连续变化的物理量进行处理。

世界上第一台电子数字计算机 ENIAC 于 1946 年在美国宾夕法尼亚大学莫尔学院研制成功，它总共用了 1.8 万多只电子管，总重量达 30 吨，运算速度为每秒 5000 次。我国第一台通用电子数字计算机——104 机于 1959 年完成，是我国计算机发展史上的里程碑。104 机采用近万只电子管，每秒运算 1 万次。以电子器件作为划时代标志的数字计算机已经历了四代：使用电子管的数字计算机为第一代；使用晶体管的为第二代；使用中、小规模集成电路的为第三代；使用大规模和超大规模集成电路的为第四代。计算机从第四代向第五代的过渡其时间比前几代相对长了许多。对第五代计算机曾有几种说法，先认为光计算机是第五代机，后认为智能计算机是第五代机，也有人说神经网络计算机是第五代机。虽然这些计算机未能成为第五代机，但是对它们的研究仍在积极进行。目前，一般认为第五代计算机的主要特征应该是：以高性能微处理器为硬件基础；具有网络计算机环境；应用图形和多媒体技术；系统软件是标准通用的软件平台，有自然友好的人机界面。其实，目前的 PC 机均已达到

上述指标，这种称之为第五代机的说法，现在也很少提起了。从规模上讲，电子计算机又可分为巨型、大型、中型、小型、微型计算机。在数字计算机中，不采用惯用的十进制数及计算规则，而是采用二进制数及相应的布尔代数运算规则。二进制编码不但可以用来表示数，也可以用来表示各种符号、控制命令等。数字计算机采用二进制时的运算速度比采用十进制时的速度更快，并且其符号处理能力更强。

此外，最近10多年来，混合计算机和多媒体计算机的发展十分迅速。既能处理数字信息又能处理连续变化的物理量的计算机系统称为混合计算机，它由混合接口、数字计算机和模拟计算机三个主要部分组成。混合计算机继承了数字计算机和模拟计算机两者的特点：计算精度高、存储容量大、逻辑功能强、解题速度快、操作灵活、仿真能力强等。在混合计算机中，模拟计算机主要承担快速运算任务。应该说明的是现在的PC机都能具有上述的功能了。数字计算机的任务是，对整个系统进行监督控制和数据处理，产生模拟机所需要的迭代运算程序等。混合接口的作用是，通过模/数转换器和数/模转换器将模拟计算机和数字计算机的变量进行变换，传送逻辑与控制信号等。混合计算机主要应用于复杂系统的实时仿真，如：导弹系统、航天飞行器系统等的仿真。

多媒体计算机是具有综合处理文本、图形、图像、声音、视像等多种媒体信息能力的计算机。多媒体计算机系统有三种平台，第一种是以含有图像、声音处理功能的工作站为基础，它有良好的硬件、软件支撑环境和开发条件，便于专业人员使用；第二种是一体化的多媒体计算机，它是将声音、图像的专用芯片装在主机板上，用户无需做任何扩充就可以直接使用；第三种是在常用的微型计算机上配置声音卡、CD-ROM等部件，使微型计算机升级为多媒体计算机。多媒体计算机技术有三个特点，第一个特点是数字化，各种媒体都是用数字来表示，这样才能实现用计算机进行综合处理。第二个特点是集成性，各种媒体通过

计算机处理相互联系在一起。声音、图像、文字等都可同时出现，同时说明一个主题。第三个特点是交互性，采用图形用户接口使人机关系更友善。用户可以干预节目的内容与次序，选择机器的工作进程。多媒体技术出现于20世纪80年代初，很快就成了计算机研究中的热点，自第一台多媒体计算机于1985年问世以来，发展非常迅速，已风靡全球，体现了多彩的世界。如多媒体会议系统，多媒体教学辅助系统，查询和导游系统，电视节目和广告的制作，娱乐和家庭教育等，几乎遍及了所有的计算机应用领域。其实，近几年来随着个人计算机的发展，一般的PC机都具有上述功能了。实际上，和我们接触较多的是个人计算机（又称为微机，PC机），下节我们将较详细地作些介绍。

7.2 个人计算机与网络

7.2.1 个人计算机（微机）的应用和发展

个人计算机已经融入到普通市民的生活当中，而且还将继续渗透到人们生活的各方面的深层次的角落里去，互联网给予人们带来的喜悦，更有望促使互联网专用终端接口不断开发出来，由于高功能化，运行速度的提高，为了能更好地掌握它的操作，对个人计算机来说某种程度上的练习更是愈来愈频繁了，也就是说若排除了互联网来谈个人电脑世界是不可能的了。

伴随而来的是，作为个人电脑的操作系统，虽已标准化了，在很长的时间内还将继续使用下去，但作为常用操作系统软件的 Windows 也并没有一直能使用下去的绝对存在感，若是专用机时，即使不固定使用 Windows，也能得到一个非常容易使用的环境，由于“Web 浏览器”的这个软件的广泛推广应用，可以为使用者通过互联网开拓了更大的空间。关于个人电脑在早几年曾有人提出一些疑问：“在今后，个人电脑会从家庭中消失掉

吗?”对此,我们并不能确切地来回答它,总之,仁者见仁,智者见智,各方面都有不同看法,到目前为止,它还一直在起着很重要的作用。例如,家电产品、电话、音响制品、电视、家庭游戏机等设备和微机相连接,能形成家用的网络,而其核心部分,则是起着有集中控制任务,且有高度运算、处理能力的个人电脑。更有一个重要事实值得注意,即其实每种信息家电的内部都含有电脑。这样谁都可以起核心作用了。

在这种状况变化的过程中,个人电脑能使用和不能使用之间的差别,也就是常常被人们所讨论的数字分割的问题,以及如何保证其正常工作的问题,这些也都是重要的课题,此外,不仅在有关技术方面,而且从行政部门上来努力保证以期能顺利实行,也是摆在人们面前的课题。

在微机与宽带互联网的相接及其与 CD、录像等的组合上,与电视广播的播放一样,已经走入家庭,并配有实际、丰富的浏览器。但在为了求得生活丰富而作贡献的机械中,也是需要它能有高度的运算能力的。美国前副总统戈尔是第一位把物质流、信息流与汽车高速公路、信息高速公路联系起来进行思考的人,对于现在的状况来说,这就比如:有了高速公路后,就要能找到能舒适快驰的汽车才能与之相配;可现在是先有车了,而道路尚不能说是达到整齐漂亮的状况。因此今后,将是操作着新型个人电脑,迎着新的挑战,在新世纪的大路上而阔步向前了。

目前使用的个人电脑有台式个人电脑(desktop personal computer),笔记本式个人电脑(notebook personal computer),超小笔记本电脑(sub-notebook personal computer)以及个人信息处理携带终端 PDA(personal digital assistant). 目前常用的 PDA 是将手表、手机、CDMA 电话合于一体,它能处理使用者的日常生活中的日程计划安排、备忘录、大事记、通讯录等信息内容。由微软提供得到 OEM 后,各个厂家也都拿出了各种形式的 Windows CE 机。

另外,独自把 Plam OS 搭载上去的有 Palm Computing

m100 等,日本索尼公司接受 Plam OS 的提供后,于 2000 年 9 月向市场投放了 CLIE。一般的个人计算机(微机)系统是如图 7.1 所示而构成的。

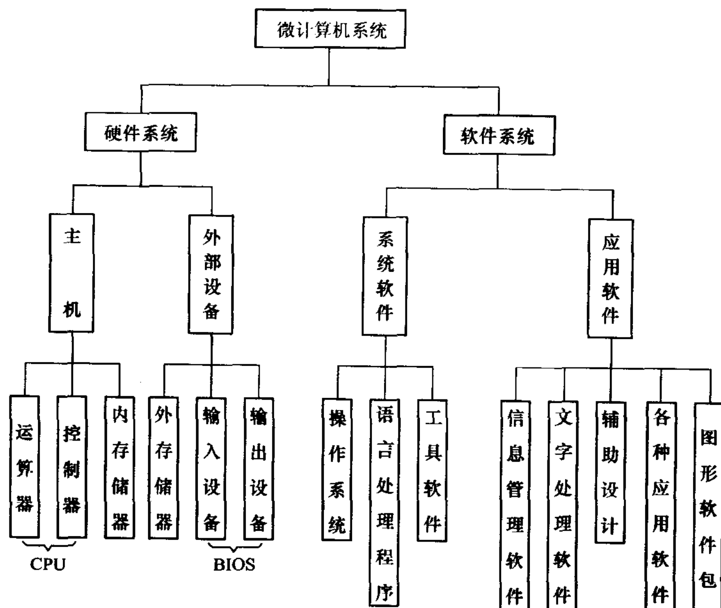


图 7.1　微计算机系统组成框图

微机的两大系统:硬件系统和软件系统,是微机实现各种功能的基础。

硬件系统

硬件是指组成一台计算机的各种物理装置,它们是由各种实在的器件所组成。它们是计算机工作的物质基础,也是计算机软件发挥作用、施展技能的舞台。通常,计算机的硬件是由以下几部分组成:

• **中央处理器**——简称 CPU(Central Processing Unit),它是计算机的心脏,包括运算器与控制器两个部件,其中运算器负责对数据进行运算(即对数据进行加工处理);控制器负责对程

序所规定的指令进行分析，并协调计算机的各种操作。

• *存储器*——它是计算机的记忆体，负责存放程序和数据。存储器又分内存储器与外存储器两种。

• *外部设备*——它是计算机与外界发生联系的部件，包括输入设备与输出设备。其中输入设备负责把用户的信息(如程序、数据等)输入到计算机中，常用的输入设备有键盘、鼠标等。输出设备负责将计算机中的信息(如程序、结果或其他数据信息等)传送到外部媒介，供用户查看或保存。常用的输出设备有显示器、打印机等。

由此可看出，计算机硬件的基本功能是接受计算机程序的控制来实现数据的输入、运算、输出等一系列根本性的操作。在计算机硬件中，CPU与内存储器合起来又称为主机。

软件系统

计算机的软件是指在硬件设备上运行的一些具有特定功能的专用程序，没有硬件就没有计算机，没有软件，硬件就是一堆废铁。软件包括系统软件和应用软件两大类，在每一大类中又分为若干类型。

1. *系统软件*

系统软件是计算机系统的必备软件，主要功能是管理、控制和维护计算机中的各种资源(包括硬、软件)，使这些资源充分发挥作用，提高计算机的工作效率。另外，还要方便用户使用计算机。系统软件又包括操作系统，语言处理程序以及常用的一些工具软件。

(1) 操作系统

系统软件的核心称为操作系统(Operating System)，简称OS。操作系统是系统程序的集合，它的主要作用是对系统的硬、软件进行合理的管理，协调计算机系统的各部分之间、系统与用户之间、用户与用户之间的关系，所有其他的软件都是建立在操作系统的基础之上，并得到它的支持和取得它的服务。它建立了用户与计算机之间的接口，用户利用操作系统提供的命

令与服务去操作计算机。

目前微型机使用最广泛的操作系统大致可分为两类：一类是由微软公司最早期推出的DOS磁盘操作系统，该系统耗用机器资源少，使用简单，也是80年代微机的主要操作平台。

DOS是磁盘操作系统(Disk Operating System)的简称，它有两种版本，一种是MS-DOS，由美国微软公司开发，一种是PC DOS，由IBM公司开发，两个公司开发的DOS功能上等同。DOS是用户与计算机之间的接口，用户通过它来使用计算机，它又为不同的用户提供了不同的界面，是属于单用户、单任务磁盘操作系统。DOS磁盘操作系统结构严谨、使用方便，是当今世界上最为流行的一种微机磁盘操作系统。从1981年产生到现在，经历DOS2.0、DOS2.1、DOS3.0、DOS3.1、DOS2.3、DOS4.0、DOS5.0、DOS6.0、DOS6.2等，其功能越来越强。目前，DOS操作系统在我国已经汉化，常用的汉化版本有：CC-DOS、UCDOS与XSDOS。

1981年IBM公司推出了个人微型计算机。采用DOS作为操作系统，经过十几年的发展，PC机在很多领域都得到了广泛应用，DOS也得到了广泛的应用。因为DOS推出较早，所以它存在一些难以克服的缺点，如只支持640KB内存，界面为字符方式，只能单个任务等。计算机软件的发展总方向是方便用户使用的发展方向。80年代后，软件的用户界面强调“所见即所得”的要求。操作系统作为系统软件的核心，也一改过去只强调功能而转为以更友好的方式提供用户使用。Windows操作系统即是基于这一思想的产物。1990年，微软公司推出Windows 3.0取得了极大的成功，Windows 3.0是在MS-DOS操作系统上运行的基于图形方式的多任务、多窗口操作环境。采用了形象直观的图形界面，引进了多任务机制，用户能方便地操作计算机。1992年又推出了英文Windows 95，与Windows 3.x相比，作了很大的改进，它是一种全新的32位操作系统，它具有友好

的图形用户界面,强大的多任务性能,先进的网络和多媒体功能,它能使用户更方便、更有效地使用计算机。

1998 年又推出 Windows 98, 2000 年 9 月推出了 Windows ME(Windows Millenium Edition),与此同时还有向企业推荐的 Windows NT, 2001 年又开发了 Whistler.

Unix 系统是世界上应用最广泛的一种多用户、多任务、多进程、功能强大的操作系统,该系统是 1969 年由美国 AT&T 公司 Bell 实验室的 D. M. Ritche 和 K. Thompson 联合开发的, Unix 自设计以来,不断发展、完善,现已广泛用于小型机以及工作站,并已成为工作站,高档个人机的标准操作系统, Unix 实际有不少版本。目前能用于 PC 机上的 Unix 有 SCO Unix, XENIX, Linux 等, Linux 是免费的 PC 版本 Unix, 值得一提的是 Linux 是芬兰的大学生 Linus 和 B. Torvalds 在学生时代开发的,他们是在 PC 机上从零开始开发出和 MINIX 互换的微机用操作系统,进而又将 MINIX 用于教育上做成与 Unix 互换的微机操作系统,其结果是 Linux 作为 Unix 互换的 PC 机操作系统,飞跃地普及开去了。1991 年 10 月最初的版本就免费向外提供,现在已经成为另一类广泛应用的 Unix 操作系统了。

(2) 程序设计语言与语言处理程序

人们要利用计算机解决实际问题,一般首先要编制程序,程序设计语言就是用户用来编写程序的语言,它是人与计算机之间交换信息的工具。实际上,程序设计语言也是人们指挥计算机工作的一种重要工具。程序设计语言是软件系统的重要组成部分,相对应的各种语言处理程序属于系统软件,程序设计语言一般可分:机器语言、汇编语言和高级语言三类。

(3) 工具软件

工具软件是开发和研制各种软件的工具,因此,它也是软件系统的一个重要组成部分。常用的工具软件有诊断程序、调试程序、编辑程序等。

2. 应用软件

应用软件主要是提供在各个领域的辅助功能，它也是绝大多数用户学习计算机，使用计算机时最感兴趣的内容，所谓应用软件，是指利用计算机以及其提供的系统软件为解决各种实际问题而编制的计算机程序，这些程序具有很强的实用性，专门解决某个应用领域中的具体问题，因此，它有很强的专用性。

作为个人计算机(PC 机)，还有进一步需要讨论的 PC 机的外围设备，接算机接口等许多问题，因为这些已经是专门知识范围内的内容了，这里就不再详细介绍了。

7.2.2 网络技术的发展

随着人类通信交往的频繁、密集，在知识共有化，现代通信高速化、功能化的基础上应运而生的网络技术逐步发展和强大起来了，所谓计算机网络就是计算机群体的集合，它们彼此用传输介质连接起来并遵守共同协议进行运行、通信。这里要说明的是我们不能单纯地把网络看成为物理上的用许多连线连成的一个实体网，网络也是一个逻辑网，它可以用线也可无线，总之，这个传输介质是广义的。上网机器可以是任何机型的。网络的发展实际上是知识的共用、功能的扩展、速度的提高等的结果。时至今日，甚至有人提出了“个人电脑时代即将寿终正寝”的说法，一时间沸沸扬扬，似乎个人计算机其生命已是暮年之朽，岌岌可危了。对此，比尔·盖茨 1999 年 6 月在日本的《新闻周刊》上发表了一篇短文，他称：“不管怎样，至少有一点我可以保证，我敢以微软公司的名义来赌注个人电脑的光辉未来，那就是个人电脑前景无量，仍是巨无霸。”但是，即便如他所说：“个人电脑前景无量”，也不能不重视网络技术的发展，而且 PC 机与网络连接中的许多问题又是值得重视的问题。首先是网络接口(network interface)问题，将 PC 机与网络相连接需要一个局域网适配器：相应的卡和这些扩张卡都已被制成商品的单元，而且根据 PC 机机型不同也有不少内藏到机内去了，为了使多台 PC

机与网络相连，则要有相应的插孔，以便使各个 PC 机通过接口与相应的电缆相接。这样各个 PC 机都处于可以通讯的工作状态，而且相关的文件、打印机等都可以共用了，现举一个家庭网络的实例(如图 7.2)，供读者参考。

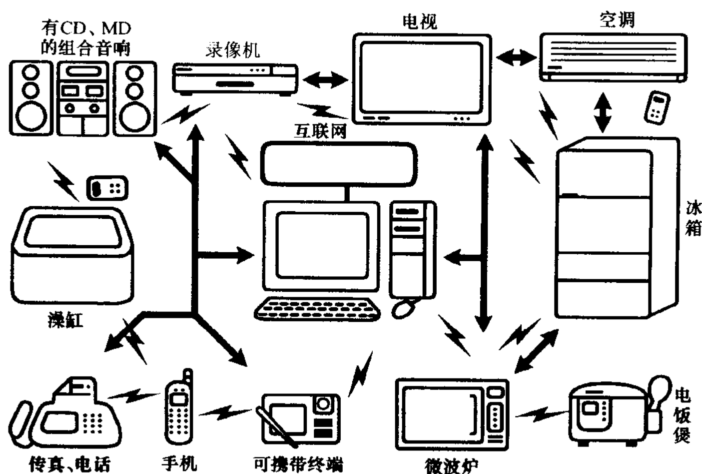


图 7.2　家庭网络实例图

近年来，随着计算机网络技术和计算机本身的发展，为利用计算机通信奠定了基础，尤其利用者层面的扩大，移动通信的急速的发展，各种利用计算机和计算机相接的装置、设备的不断出新和完善，可以说计算机已经作为人类的交流和知识共有的基础在科学技术发展中崭露了头角并奠定了地位。

日本曾有过一个统计，截止 2000 年 1 月已有 7200 万台计算机进入了互联网，2000 年版的通信白皮书报道，日本参加互联网的人数有 2706 万人，家庭普及率达到 19.1%，这大大超过了几年前的预想，而且它还在以惊人的速度发展，移动电话、无线呼叫等也都上网了，在日本，EZ-Web，J-Sky 等的接受和与 IP

相接服务的签约者人数达到 1700 万人之多,由于成本低,使用方便,这也成为女性使用者的人数大大增加的一个重要原因,与使用者增加的同时,又诞生了虚拟的社会空间、虚拟现实的网络。

所谓的虚拟现实可定义为计算机产生的三维空间,令人们身临其境,可操纵以及可相互交流。从这种意义上讲,“虚拟”(virtual)一词由计算机虚拟存储器(virtual memory)派生而来,给人以逼真的感觉,实际上则是虚拟的立体空间。

人类的视觉原本是对三维空间图像产生的反应,比我们现在对二维平面图像的反应要强烈,虚拟现实的三维立体空间,令人身临其境,以便从各个方面更好地观察事物的本质及其相互关系和发展趋向。

虚拟现实不仅是一种设计,而且还是一种表达和交流的媒介,一种创造和体验的方式,令人们享受计算机产生的充满奇幻乐趣的世界。

虚拟现实也可称之为“人工现实”、“扩大现实”或“远距离现实”。然而,“虚拟现实”这种提法较通俗,可激发人们创造和体验的激情。

对于虚拟现实准确的定义,这个问题还有争议,但多数评论家认同了一个必要的特征,那就是虚拟现实可令人犹如身临其境,并可进行实时操纵和相互交流。

虚拟现实可望成为将来最重要的技术之一,将会在很多领域得到很大的发展。虚拟现实的影响将波及艺术、商业、通讯、设计、教育、工程、医药以及其他很多领域。

随着网络的技术的发展,在众多使用者当中,也有为网络发展设置障碍,制造麻烦,甚至在起着破坏作用的,这里给大家介绍一下有关病毒、黑客等问题。

所谓计算机病毒是有人在软件和数据中做了一些以破坏计算机运行或者使计算机数据丢失、出错等为目的的程序,并将这

些夹杂着其他程序随正常的信息传递而扩散，它也具有类似于人们由于感染病毒而出现的感染、潜伏、发病的特征。因而被称为病毒，感染病毒后，一般是对存储、内容、画面的一些恶作剧的戏弄，而厉害的就使得整个硬盘受到破坏，其可恶行为是多种多样的，一般是通过软盘侵入的较多，近年来，由于网络的发展，局域网的普及，通过网络的传递感染正在增加。

病毒有以下几种类型：

一是最近急增的在有宏功能的电子表格系统的软件中侵入黑屏病毒。其他还有文件感染型病毒和硬盘系统中受感染的专门侵入的系统感染型病毒。除了一般的病毒外还有通过和网络相接的计算机接口间，自己增殖并随着热量传递而移动再侵入的所谓“特洛伊木马”，它在潜伏一定时间后才会发作。2000 年 8 月在携带终端“Plam”感染的病毒 Palm, Liberty. A 就是这种“特洛伊木马”病毒，2000 年 5 月出现的“爱病毒”(I love you)，使网络社会陷于一片恐慌中。1999 年出现“美丽莎”病毒造成的损失竟达 100 亿美元。“爱病毒”的制造作者是菲律宾马尼拉市的学生，当时菲列宾对此尚无法律可循，由此可见，网络空间也应有相应的法律的共同约束才行。

关于“黑客”(hacker)的报道已经不少，一般而言，所谓“黑客”多数是指进行不正当的上网活动者。其实，起初被称为“黑客”的是和我们文章中常称为的“黑马”一样，是对在计算机方面有丰富的知识、有高度的娴熟的软件创造能力的、有实力的电脑使用者的尊称，而在计算机方面，以不法侵入的方法，以盗窃、篡改和破坏等违法行为为目的的犯罪者常被称为“cracker”。这和前面所提到的“hacker”是有区别的，应该作为贬义的“黑客”一词，通常指“cracker”的。但近来常常在一些文章中混淆了。

为了对这种非法侵入和破坏能有所防止，各国都采取了相应的对策，我国的一些“防火墙”，杀病毒软件都是其中的一些措施，图 7.3 是不正当上网情况的例子。

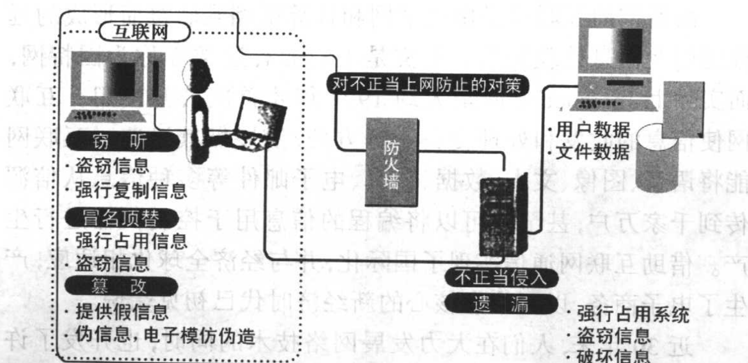


图 7.3　不正当上网的例图

7.2.3　互联网网络和社会

互联网

在前面几节中，我们曾引进过"互联网"这个词，但未作过多的解释，这里，我们再较详细地作一个介绍，如今，我们在日常生活中会遇到不少网络名词，它们是从不同的角度描述了网络。

首先是从网络覆盖的地域范围上来讨论，则常见的有局域网(LAN)，城域网(MAN)，广域网(WAN)和全球网(GAN)。

——从网络构成的拓扑结构上，有星型网、环型网以及网状网等多种类型；

——从传输的物质介质上，有同轴电缆网、光纤网和无线网等；

——从网络的硬件设备上，有各种网卡、网桥、网关、集线器、路由器、交换器、服务器以及客户机等；

——从协议标准上，有 IEEE 的 802 系列标准，TCP/IP 协议等；

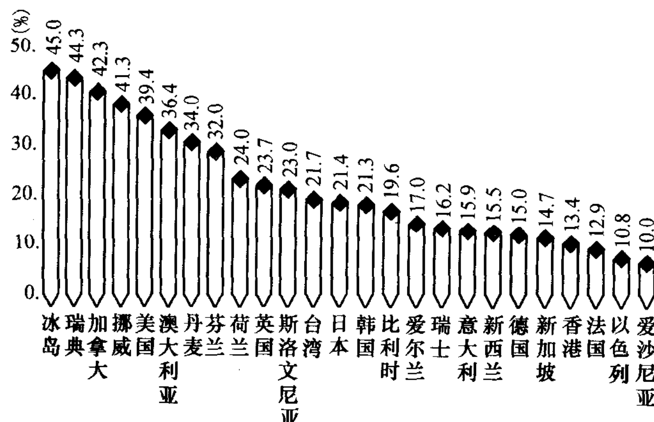
——从网络操作系统上，有 Windows NT、Net Ware 等；

——从网络提供的服务上，有电子邮件、新闻服务、电子商务等。

而所谓的互联网是由电话网和计算机相互联接而形成的远程通信及信息处理网络。英文是 Internet，通常亦称为因特网，而实际上 Internet 一词是大约 1997 年才首次公开使用。互联网使信息的收发和处理变得十分方便，发展极其迅速。互联网能将语音、图像、文本、数据、传真、电子邮件等多种信息从信源传到千家万户，甚至还可以将编程的信息用于控制机器进行生产。借助互联网通信实现了国际化，并与经济全球化相适应，产生了电子商务，以网络为核心的新经济时代已初见端倪。

近 30 年来，人们在大力发展网络技术的同时，也开发了许多数据库，将这两者结合起来，可以说人们正在建设一个全球范围的数据库，它包括人类已经积累的各个领域的知识以及每时每刻还在产生的信息。要将这些浩如烟海的知识和信息按照时间顺序组织起来，并且按顺序去检索，实际上是不可能的。为此，科学家模仿人类记忆的联想能力，提出了“超文本”概念。所谓超文本就是按照人类的思维方式来获取计算机中信息的一种方法，其最大特点是从任一元素都可以随意地选择另一元素。这样的文本与传统的顺序文本不同，故称为超文本。80 年代初，欧洲高能物理研究中心的伯纳斯·李开发了第一个超文本程序，它能将学术文档链接在一起，只需按一个键就能从一个文档跳到另一个文档。1991 年出现了第一个浏览器程序，但是直到 1993 年美国国家超级计算机应用中心开始出 Mosaic 浏览器，才使互联网变得非常好用。对整个世界而言，这套软件具有划时代的意义，它推广了 Web 浏览器，建立了 World Wide Web（简称 3W 或万维网），几乎一夜之间 3W 成为人们转送信息的常用方式。事实上，互联网是网络，3W 是数据库，是遵循 HTML（Hypertext Markup Language，超文本标识语言）编写的具有超文本链接的全球信息系统，它是使 3W 文档页面化的语言。1995 年美国的 Sun 公司的詹姆斯·高斯林发明了网络编程语言 Java，为 3W 页面增添了动画。Java 的语言的重大意义在于，它使编程技术适应网络环境。

2000年日本发表的"通信白皮书"发表了各国和地区互联网普及率和按地域的比例,如图7.4所示。



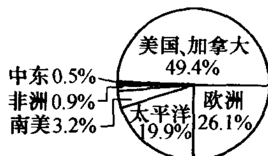


图7.4 互联网地域的普及率

全球互联网的建设是20世纪最伟大的工程之一,它已经对人类社会的生产和生活方式产生了巨大影响。我们在前面已经提过美国前副总统戈尔是第一位把物质流与信息流、汽车高速公路与信息高速公路联系起来进行思考的人。1993年9月15日,美国政府发表报告,阐述了"国家信息基础设施(National Information Infrastructure)"规划,简称NII计划。社会传媒借用戈尔的说法把它形象地称为"信息高速公路"。NII计划顺应了历史发展的潮流,立即引起各国政府的强烈反响,纷纷提出各自的跨世纪工程规划,甚至还召开国际会议研讨"全球信息基础设施(Global Information Infrastructure,即GII)"的问题。

NII计划最重要的目的是为生活在信息时代的人类建造一个崭新的生活基础,实现一个容易获得信息的环境,并使这些信

息造福于广大民众及社会各界。NII 计划的基本目标有 4 个：(1) 降低政府服务成本；(2) 提高公营和私营机构的服务质量；(3) 鼓励公众使用新科技、新工具，改变人们的生活方式和工作方式；(4) 为信息产业和网络公司创造更多的商机。NII 计划不仅仅是联网，而是网络技术、通信技术、数据库技术、多媒体技术、人工智能技术以及其他高新技术的结合。要完成 NII 计划的目标，还有很长的一段路要走。但是，从目前的情况来看，互联网已经渗入到现今社会的各个角落。图 7.5 表示了互联网和相关的示意图。据现有资料报道，截止 1998 年我国上网用户达 106 万户，上网机器达 52 万台，2000 年上网用户已逾 400 万户，2002 年上网用户已有千万以上。但由于我国人口的基数大，所占比例当然不会太大，然而，这种迅猛发展的势头将是可观的。

网络和社会

Internet 之所以能够迅速普及，并引起前所未有的反响，还在于这项技术的作用已经远远超出了信息产业的领域，进而对社会经济生活的整体，对包括国与国关系在内的政治文化结构，乃至对人们的价值观念和生存方式都形成了强有力的冲击。正如现代信息社会的传教士、《数字化生存》一书的作者，即美国麻省理工学院教授尼葛洛庞帝（Negroponte）认为的那样："计算机不再只和计算机有关，它决定我们的生存。"

今天的 Internet 已不再是计算机人员和军事部门进行科研的领域，而是变成了一个开发和使用信息资源的覆盖全球的信息网络，构成了一个信息社会的缩影（图 7.5）。Internet 的应用领域包括：教育、科研、工作、旅游、娱乐（游戏、听音乐等）、购物、医疗、电子报刊、参加各类信息小组的讨论、刊登广告、公司及项目的跨国管理，等等。在有些国家，还实现了网上的电子商务、电子银行、电子国际贸易等业务。以上所列举的这些 Internet 应用，有些似乎离我们还较遥远，有些应用已实实在在地发生在我们的身旁了。Internet 将深刻地改变当今的社会结构，极大地解放社会生产力，将使人们突破物质条件的束缚、时空的限制，有

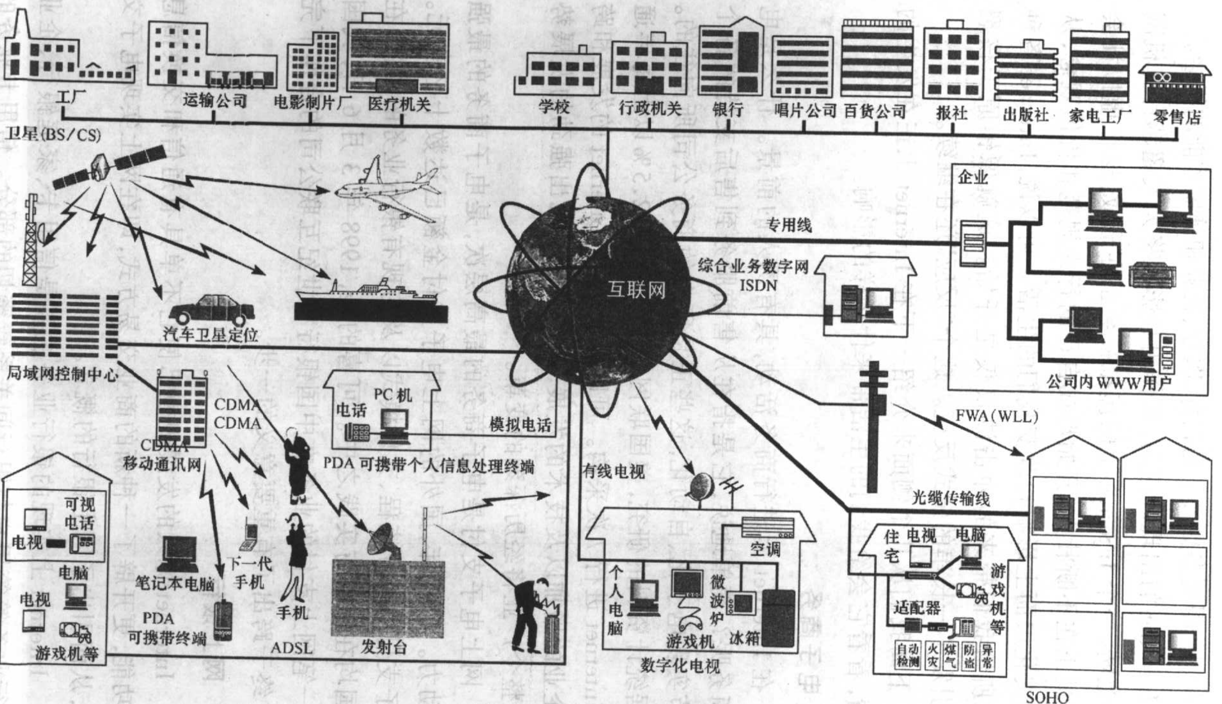


图 7.5 互联网与社会相关示意图

助于人们获得更多更公平的教育、医疗、就业和施展才能的机会。

Internet 的出现及应用，其作用和影响将大大超越计算机网络的范畴，一个 Internet 上的虚拟社会正在形成，这个虚拟社会的成员正在不断壮大，开始形成自己的行为规范和价值观念，从而在文化层面上影响和改变我们的生活。可以说，Internet 各种应用所给我们带来的冲击波仅仅是开始。这就像铀原子核裂变，引发了一长串的链式反应。这个"反应"还在继续。

下面我们从几个侧面来介绍一下在 Internet 上正在发生的事情，看看它会给我们的生活带来什么样的影响。

电子商务

在 Internet 上进行商务活动，具有诱人的前景。什么是电子商务呢？简单地说，它是指在从售前服务到售后支持的各个环节实现电子化、自动化，这些正是所有的商务公司所向往的。根据统计资料的研究，美国联网的家庭中有 12.5% 以上每年通过 Internet 进行 7 次采购。可以看到，随着 Internet 的发展和跨国企业的增加以及技术的发展，电子商务呈现出强劲的发展势头，整个产业将经历深刻的变革。

网上电子支付是电子商务的最高层次，是电子商务的最强推动力。1997 年，国外的网上电子支付金额已达数十亿美元。电子支付的业务流程、支付模式以及与现有银行业务的衔接，在我国均在探索与实践之中。可喜的是，1998 年 3 月 6 日，我国第一笔网上支付的业务在中国银行和世纪互联公司的合作下完成，终于跨出了有重要意义的一步。

网上银行

Internet 惊人的发展规模已使它不单具有通信和交换信息的功能，更开辟了一种新的商业交易方式，即在网上实现电子交易，从而引出了网上银行的概念。

Internet 上实现的银行业务主要是信用卡、家庭银行、企业银行业务等等用户与银行间关系较密切的部分。信用卡业务的

授权、清算都可以通过 Internet 进行处理，家庭银行业务则包括存款余额、交易明细、票据兑现、利息的查询及电子转账等。从目前国外一些银行在网上银行实现的功能分析可以看到，Internet 银行应用的主要方式是通过在 Internet 上建立服务器，给网上的用户提供访问，功能主要包括电子通信(E-Mail)、银行信息发布以及银行业务的处理等。

第四类媒体

Internet 的发展已经或将要涵盖人类有史以来所有信息技术和信息传播革命的成果，它将和印刷术的出现一样，极大地改变人类生活和工作的方式。不管人们承认与否，Internet 已成了当今全球最大的一个传播媒体。有人把 Internet 称为第四类媒体，此前的三类分别是报刊、广播、电视。报刊是纸质媒体。

事物的发展似乎总是后来者居上，第四类媒体的优势极具吸引力，首先是速度快，时效性强。它不受印刷、运输、发行等因素的限制，信息上网的瞬间便可同步发送到所有用户手上。二是海量存储和覆盖全球的传播范围。它创造的电脑空间“可把全世界一网打尽”，让你“足不出户而全知天下事”。三是超文本的检索方式使信息变得生动活泼，用户易于接受，乐于接受。四是信息传递的交互性使用户不再只是被动的接受者，从而适应了现代人崇尚自主、渴望参与的心理要求。

网络新闻是第四类媒体的重要传播形式之一。互联网络技术为新闻报道所提供的新的表现方式，也是网上新闻得以发展的重要原因。例如，全天 24 小时新闻覆盖是新闻报道的目标之一。互联网络的全天在线性使它成为少数可以达到这一目标的传媒之一。而且与电台、电视的新闻覆盖不同，互联网络读者可以在某一时段内选择不同栏目的新闻阅读，它将报刊的版面性和电台、电视的及时性很好地结合在一起，从而在保证及时的同时，给予人们更多的选择自由。

网上远程教育

远程教育是教育界一直想努力实现的一种教育手段。它不

受地理与其他条件的限制，为学习者提供了一种开放式的教学环境。Internet的普及应用使得远程教育的真正实现成为可能。现在你只要安坐在家中，便可通过互联网学习有关的网络课程。有些专家认为，再过若干年，传统的课堂式教学将让位于在Internet上进行的开放式教学，世界知名的大学可能“出口”著名教授的课程，使得全球各地数以百万计的学生能够同时受益。

除灵活性之外，网上教学还能提高“虚拟课堂”讨论的广度和深度。目前，美国约有80所大学允许通过网络修得学位，网上虚拟大学开出的课程已覆盖了各主要学校领域。斯坦福大学是美国第一所通过互联网向学员授予硕士学位的大学，接收斯坦福大学网上提供的电气工程专业教学的学生，在完成学业后可获得该大学授予的这一个专业的硕士学位。该教学计划主要针对那些在职的人员，他们将花3～4年的时间，接受网上教学，以获得学位。而加拿大的Athabasca大学则将在职MBA教育完全搬上了Internet。

国内的网上远程教育方面也开始探索，清华大学、浙江大学、北京邮电大学已被教育部批准为开展现代远程教育的首批试点院校。中国第一所网上大学——湖南大学多媒体信息教育学院业已开学，分布在全省14个地、州、市的15个远程教育点，有1000余名学生，通过公众多媒体网开始了第一堂课的学习，这些网上大学生中百分之九十是利用业余时间上学的在职人员。通过4年的学习，在修满180个学分后，他们将分别获得国家教育部颁发的英语和计算机专业的成人教育本科毕业文凭和学士学位证书。这标志着中国多媒体远程教育已正式启动，是中国教育界发展史上的一件大事。当然，网上远程教育只是一种教育手段，它不可能完全代替传统的课堂教学，而是能作为当前教育上的一种补充。

电子政府

由于网络在教育、福利、医疗方面的广泛应用，日本政府曾在前年(2000年)提出了政府以下一代产业的发展为目标，政府

和民间共同开发千禧年计划，其中重要的一环就是行政手续全部电子化，并要求在2003年推广到各个部、厅等国家行政机关部门，并向日本全国的小学、初中、高中(总计约有4万所)提供所需的互联网的环境、设备，开发具有世界水平的软件，开发并配备比现在运算能力高1000倍的硬件设备，除了在信息、通讯领域外，在生物、环境等领域也同样下大气力。

利用互联网把就业问题纳入新的轨道，现在的就业问题中的职业介绍会及相关的活动，电脑和互联网是必不可少的了。如企业情况说明会的日程通知;参加、登记;提供资料;社会调查等都使用了电脑和互联网。

在日本，较多企业90%以上通过互联网得到人才信息，有的企业还在网上对应募者进行初试来选择人才。近几年来，对毕业的大学生也应用互联网，在网上发布招聘消息，并汇总应募求职者进行检索、对比、分析。

新的交流方式及负面影响

Internet交流方式在于它所创造的独具特色的网上空间，为现代人的交往提供了一个全新的交流场所，与我们传统的交流方式有着明显的不同。主要表现在:

• 网上空间具有虚拟性，不受地理范围的限制，即使你是个足不出户的家庭主妇，也可以手握鼠标与世界各地的人交谈。

• 网上空间具有开放性、交互性，且覆盖广袤。上网者可以定向抵达一点，也可以同时抵达多点，从而形成颇具规模的“交际圈”，为人们在更大的范围里交友、择友提供了前所未有的便利。

• 网上交流可以“匿名进入”，正如比尔·盖茨(Bill Gates，美国微软公司总裁)在他的《未来之路》一书中那幅有名的漫画所描绘的一样:“在Internet上，没人知道你是只狗。”交谈者可以对对方的真实身份一无所知。只要交谈双方愿意，都可以就某个问题开展讨论，这也便于人们以平等的身份进行交流，使交流变得更加自由和轻松，于是也就造成了一大批热衷于网上交流

的“网迷”或“网虫”。

不言而喻，网上交流这种新的交流方式将对个人心理、观念和行为方式产生影响，也包括对社会经济、政治和文化运行方式的影响。它也会带来一些负面的影响，例如：现实社会中的一些犯罪行为反映到网络上，网上贩毒，网上诽谤、中伤，网上泄密，出卖情报，发布匿名信，性骚扰等等都在增加，而且向低龄化方向发展。至于前面所提黑客、病毒等问题也成为网上的危险了。在这些方面已出现不少有关的报道，当然，作为新生事物，出现这样、那样的问题也不足为奇。正如 20 世纪杰出的生物学家、科学哲学家 J. 赫胥黎所说：“人类历史到现在只是占了人类未来所能拥有时间的极小的一部分，以未来人类的眼光看，现阶段的人类正在做的，不过是一种最初的笨拙的探索”。如果这话是对的，那么今天 Internet 所展示的一切，以及人们对 Internet 的认识，是不是正处在“最初的笨拙的探索”阶段上呢？如果是的话，我们有理由相信：Internet 的未来会更好。

7.2.4 下一代的互联网

要非常精确、全面地预测 Internet 未来的发展是很困难的，但以下几个方面是不可忽视的：

• 随着世界各国信息高速公路计划的实施，Internet 主干网的通信速度将大幅度提高；

• 有线、无线等多种通信方式将更加广泛、有效地融为一体；

• Internet 的商业化应用将大量增加，商业应用的范围也将不断扩大；

• Internet 的覆盖范围、用户入网数以令人难以置信的速度发展；

• Internet 的管理与技术将进一步规范化，其使用规范和相应的法律规范正逐步健全和完善；

• 网络技术不断发展，用户界面更加友好；

• 各种令人耳目一新的使用方法不断推出，最新的发展包括实时图像和话音的传输；

• 网络资源急剧膨胀。

但目前的 Internet 还远远不能适应上述的要求。凡有过上网经验的用户都会有这样的体会，大多数情况下数据传输的速率极慢，有时达到不能忍受的地步，以至于有人调侃 WWW (World Wide Web)是 Wait, Wait, Wait。Internet 速度慢的原因是目前大部分网络的传输信道不够宽，我国的网络传输只有每秒数十千比特，发达国家快一些，一般也只有每秒几兆比特。在今天网上用户滚雪球式地激增、多媒体应用日趋成为主流的情况下就更显得捉襟见肘了。尤其是多媒体，其应用的特点是声像并茂，对带宽的要求特别高，必须保证实时响应，倘若一帧图像传过去，下一帧图像跟不上，当然使人心烦意乱。

Internet 的 IP 地址系统也存在缺陷，Internet 的迅猛发展使可用的地址码资源紧张。旧有的 IP 地址容量较小，自 90 年代中期 Internet 商业化之后，IP 地址被迅速瓜分，有人认为这些地址将会很快被用光。

弊端发展到一定程度就是解决问题的开端，开发下一代 Internet 的计划已经启动。1996 年 10 月美国政府发表"下一代 Internet"(NGI)，把 Internet 称为人类历史上自发明印刷术以来在通信领域的最大变革。该计划保证 3 年内每年提供 1 亿美元的资金促进学术界、工业界和政府的合作开发。

NGI 要达到以下几个目标：

(1) 用比今天的 Internet 快 100～1000 倍的高速网络连接大学和国家实验室。其中至少 10 所大学和国家实验室连接网络的速度将比今天的 Internet 快 100 倍。少数机构的连接速度将会快 1000 倍。

(2) 推动下一代 Internet 技术的实验。例如，研究一些技术使 Internet 能提供高质量的会议电视等实时服务，将 Internet 可容纳的客户数目增加 100 倍，为开发新的商业应用提供实验环

境等。

(3) 开展新的应用,满足国家重点项目的需求。速度更高、性能更先进的网络能促进新一代应用(如医疗保险、国防安全、远程教育、能源和生物医学研究、环境监视及制造工程等)的开展。美国政府将提供每年1亿美元的经费,并连续提供3年,用于建立研究网络,发展NGI。

(4) 并将采用新的IP技术(IPV6),以对IP地址进行扩容和有效管理。为扩充IP地址长度,Internet工程工作组(IETF)决定改用新版本IP协议,称为IPV6(现用版本是IPV4)。地址长度由现在的32bit扩展为128bit,并有群址功能(cluster,用一个前缀地址的一群节点),简化了路由表,采用分层次选路结构(不再用A,B,C网络分类)。IPV6还增强了安全保密机制,包括鉴别(认证)报头和用户数据安全包封。IPV6还具有动态自动配置网络地址和支持实时业务能力。

设想中的NGI可称得上是真正的信息高速公路,它能以每秒600兆比特以上的速度将入网的电脑连接起来,其速度之快足以在不到1秒的时间内传输一部百科全书。可以想见,真正的信息高速公路建立起来时,在网上浏览将不会再有"堵车"的尴尬,在网上看电影、拨打可视电话、观察几千里之外的医学试验等许多应用都可以"跑"起来,网络将真正变得无所不能。

Internet 2是美国120多所大学的一项合作计划,其目的是要开发出先进的Internet技术和应用,满足高等教育的研究与教学之需。它是UCAID(University Corporation for Advanced Internet Development)的一项工程,同时还有业界和联邦政府的协同工作。

由大学领导潮流的Internet 2项目和美国联邦政府主导的NGI项目正在许多领域进行合作。例如,Internet 2项目已经同"全国科学基金"的"高性能连接"(High Performance Connections)项目进行合作。已有50多个Internet 2机械获得了有条件的准许,与NSF和MCI开发的"骨干网络服务"(Backbone

Network Service)进行连接。

大学对 Internet 2 的投资,以及业界和美国政府在这个问题上的努力,有助于 IPV6、多点广播和服务质量等技术的开发,为 Internet 应用赋予新一代的性能,从而为全社会带来益处。从 80 年代的学术性和政府性研究网络发展到今天的 Internet,已经显示了这种网络研究方法的明智之处。

NGI 和 Internet 2 建设的紧锣密鼓,刺激了一系列新技术的开发。人们正在憧憬信息高速公路的美好前景,并希望早日驶入信息快车道。

信息科学的进步还远不止于以上所述,本书中只选取了与我们生活联系十分密切的几个领域作了介绍,不过仅以上为例,也可以看到信息科学的发展对我们的生活、社会的影响之深远了,它也从一个侧面反映了科学文化向人文文化的渗透,并日益消除两者之间的隔阂。

第八讲　物理学发展中的革命风暴

8.1 引　　言

19世纪末,欧洲各主要资本主义国家的工业生产有了很大的发展,对新技术、新工艺和新产品的需求日益迫切。例如,当时白炽灯已经发明,人们为了寻找新的光源,大力进行真空和放电的研究。下面我们马上就要看到,这一点对物理学的发展有着相当直接的影响。

然而,自然科学的发展还有它本身的规律。当时的物理学正处于一场大革命的前夜,它一方面很完善了,另一方面却又暴露出尖锐的矛盾。前一方面指的是所谓经典物理学(大致可分为力学、声学、热学、光学和电磁学等分支)所达到的认识,可概括如下:

(1) 世间万物都由八十几种元素的原子所组成。

(2) 原子是不可再分的最小微粒,它的运动服从牛顿力学定律。

(3) 热就是大量分子作混乱机械运动的表现。利用力学规律性加上统计规律性及其处理方法,就可能解释气体、固体和液体等凝聚态物质体系的性质。

(4) 存在正、负两种电荷,它们可能是某种流体样的东西;电荷产生电场,电荷的运动又产生磁场;电磁场可以脱离电荷而运动,这就是电磁波;热辐射(红外线)、可见光和紫外线等都不过是不同波长的电磁波。

(5) 无论力、热、声、光、电等现象如何复杂,一切过程都遵从能量守恒定律和动量守恒定律。

面对这些成就,在绝大部分物理学家的眼光里,物质世界的

运动已经构成了一幅清晰的画面，基本问题都研究清楚了，留给下一代人所做的工作，将不过是把已有的实验做得更精密一些，使测量数据的小数点后面增加几位有效数字而已。

那么，矛盾又在哪里呢？1900年，著名的英国物理学家开尔文（威廉·汤姆孙）在一篇展望20世纪物理学的文章中说："在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了"；接着他又说："但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云。"这两朵乌云，指的是当时物理学无法解释的两个实验，一个是热辐射实验，另一个是迈克耳孙-莫雷实验。开尔文真算是有眼力的了。但他可能也完全没有想到，正是这两朵小小的乌云，不久就发展成为物理学中一场革命的风暴。而且实际上，在高潮到来之前，已经有三个重大的事件，揭开了近代物理的序幕，这就是电子、X射线和放射性的发现。

由于电磁、真空等科学技术的进步，也由于寻找新光源的需要，在19世纪最后30年里，研究真空放电的人很多。

在一个真空管（用转动泵抽气）内密封一个阴极和一个阳极，在两者之间加上几千伏的高电压，在管内的稀薄气体中便会产生美丽的放电现象；随着水银扩散真空泵的应用，管内气压进一步降低（真空度提高），气体发光现象看不见了，若在对着阴极的玻璃管壁上涂敷荧光材料，在玻璃管壁上却会产生蓝绿色的荧光。这表明从阴极发出一种肉眼看不见的射线，它沿直线行进；根据它在磁场中的偏转可证明这种射线是带负电荷的；它能穿过很薄的金箔，因此不可能是负离子。1897年，英国物理学家J.J.汤姆孙在前人大量工作的基础上，决心进一步弄清楚这种"阴极射线"。为此他重新设计了实验仪器，如图8.1，让阴极射线穿出小孔以后进入一个静电场区域，它是由两块平衡板电极加上电压 U（板间距离为 d）而产生的，人们就看到射线向上偏转一段距离；如果同时加上一个垂直于纸面向里的适当强度

的磁场 B，便又可以抵消这种偏转，而使射线仍然射到对称的中心点。通过调节电压 U 和磁场 B，测量射线不偏转时的磁感应强度，汤姆孙就能够算出射线粒子的速度 v(m/s)：设粒子质量为 m(kg)，电荷绝对值为 e(C)，则它在电场 E(V/m)中受力为

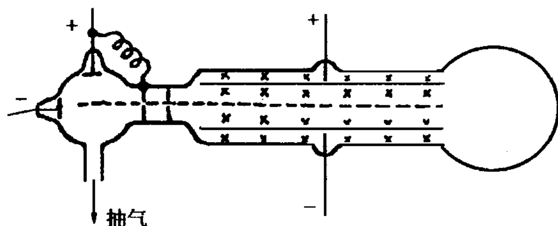


图 8.1　阴极射线管(图中×表示磁场的方向由纸外向纸里)

$$F_e = eE = e\frac{U}{d} \tag{8.1}$$

而在磁场 B 中受力为

$$F_m = evB \tag{8.2}$$

平衡时两者相等，给出

$$eE = evB,\quad v = \frac{E}{B} \tag{8.3}$$

接着，撤去磁场，测出射线在平板电极右端出口处的横向偏离值 s，这个 s 应等于 $\frac{1}{2}at^2$，而其中加速度 a 由 $F_e = eE = ma$ 决定，$a = \frac{eE}{m}$，因 s 比平板的长度 L 小很多，因而粒子的飞越时间 t 可由速度 v 及板长 L 简单地算出：$t = \frac{L}{v}$，所以

$$s = \frac{1}{2}\left(\frac{eE}{m}\right)\left(\frac{L}{v}\right)^2$$

再以(8.3)式代入，即得

$$s = \frac{1}{2}\left(\frac{e}{m}\right)\frac{L^2B^2}{E} \tag{8.4}$$

由此可见,阴极射线粒子的“荷质比”

$$\frac{e}{m}=\frac{2Es}{L^2B^2}=\frac{2Us}{dL^2B}$$

由实验测量到的 U、d、B、L、s 等数值可以算出,$\frac{e}{m}=1.7\times10^{11}$ C/kg。由于当时实验精度不高,结果仅用两位有效数字表示。

汤姆孙发现,这个荷质比数值既与管内所充气体(空气、H_2 或 CO_2 等)的性质无关,也与阴极材料(Al、Fe 和 Pt 等)的性质无关。这意味着阴极射线是由一种荷质比完全确定的粒子流所形成。直到 1909 年,有名的密立根油滴实验进一步证明一切荷电物质都只能带有 e 的整数倍的电量,而一个阴极射线粒子所带的电量($-e$)是负电荷的最小单位。e/m 不变,e 也不变,表示粒子质量 m 也是确定的。这种粒子,以后便称为电子。阴极射线就是高速电子流。根据近年的测量,电子电荷(绝对值)及质量分别为

$$e=1.6021892\times10^{-19}\text{C}$$
$$m=9.109534\times10^{-31}\text{kg}$$

到目前为止,还没有发现电荷比 e 更小的粒子。另一方面,电子质量虽然很小,只有氢原子质量的 1/1836,但却不能说它是自然界中最轻的粒子。我们以后将用符号 e 表示一个电子电量,有些书上用 e 表示电子电荷时已包括了负号,希望读者自己留意。

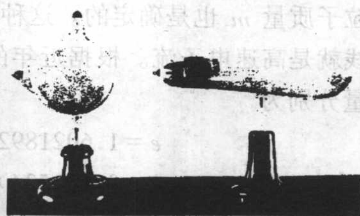
比确认电子还要早一些,即 1895 年 11 月 8 日,德国的大学教授伦琴在暗室中做放电管实验时,就发现了另一种新现象。他用黑色硬纸把放电管密包起来,无意中发现放在一段距离外的涂有一种荧光材料(铂氰酸钡 $BaPt(CN)_6$)的纸屏竟发出微弱的荧光,经仔细观察,肯定了激发这种荧光的东西来自放电管,但同时可肯定这种东西不可能是阴极射线,因为后者不能透过玻璃管。伦琴就称这种看不见的东西为 X 射线。经过连续 7

个星期的紧张研究，伦琴在年底写出了一篇论文，详细地分析了X射线的性质、产生的原因和在各种物质中的透射率。他指出：阴极射线打在固体上面便会产生X射线，固体元素越重，产生的X射线越强；X射线既不受磁场作用而偏转，也不能用玻璃透镜聚集。伦琴发现，几乎所有的物质对X射线都是透明的，15 cm厚的铅板才能显著地减弱它，而把手放在放电管和荧光屏之间时，由于肌肉对X射线的吸收比骨质弱很多，屏上便可看到手的骨骼形态。

伦琴这一发现的巨大潜在价值是显而易见的，大家奔走相告，许多实验室纷纷重复这一实验，并向听众宣讲示范，三个月后，维也纳的医院外科治疗中便首先应用X射线拍片。



伦琴(1845—1923)



伦琴用过的阴极射线管

X射线的发现者

在后来制造的"X射线管"中，是通过加热灯丝，发射出许多电子，使它们在高电压(几万伏)的加速下，轰击到重金属(如钨或钼等)制成的靶上，靶的表面便会发出很强的X射线。现已弄清楚，这是由于高速电子在靶物质内的运动受到阻碍而急剧减速，在这减速过程中，电子便会发出一种波长极短(约1Å左右，$1Å=10^{-8}$ cm，而可见光的波长在4000～8000Å之间)的电磁波，这就是X射线。X射线的发现使人们认识的"电磁波谱"朝着短波方向拓宽了一大段。下面我们还要介绍从原子核内放出来的电磁波，叫做γ射线，它的波长还要短，穿透本领比X射

线更强。

法国的贝可勒尔原来对荧光现象很有研究，1896年2月，他听说伦琴的发现之后，就想看一看不能透过黑纸的日光能否激发出X光，并再透过黑纸激发出荧光来（现在我们知道这是不可能的）。一天恰好天阴，没有日光，他就把制备好的一种样品——硫酸铀酰钾复盐（$K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$，一种当时已知的荧光物质）用黑纸包起来，放在抽斗里的照相底片上面。几天后，他怕底片有些漏光，便决定将其中一张冲洗看一下，不料洗后一看，晶体的像竟赫然在目。他于是赶紧仔细做实验，证明感光是由于样品含铀所致，铀确实发出了一种肉眼看不见的射线，这就是天然放射性的发现。

后来许多科学家从事天然放射性物质的研究，其中最著名的是法籍波兰女科学家居里夫人，她通过十分艰巨的化学分离和鉴定工作，从上吨的铀矿里提炼出微量的放射性元素钋（Po）和镭（Ra）等，镭的放射性很强，在暗室中就能看到被它自己的放射性激发出来的蓝白色荧光。但放射性本身却不是能直接见到的，于是人们把镭等放射源放在一个铅室中，让射线从狭小的通道射出来，进入一个抽真空的磁场区域，如图8.2所示，磁场垂直纸面向里。这样便发现放射性射线分成三种类型：一种射线向左偏转较小，表示它是带正电的较重的粒子流，称为α射线；一种射线向右偏转较大，表示它是带负电的轻粒子流，称为β射线；还有中间一束射线不受磁场影响，表示它是不带电的射线，称为γ射线。

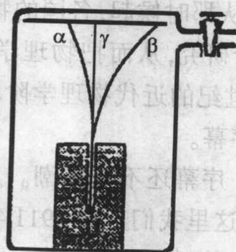


图8.2　α、β、γ射线在磁场（垂直纸面向里）中的偏转

更仔细的研究证明，组成α射线的α粒子，每一个带有二份正电荷（$2e$），质量和一个氦原子差不多；而β射线的荷质比与阴极射线的相同，它也是高速电子流；最后，γ射线性质和X射线

相近，不过是波长更短的电磁波，因而它的穿透本领比 X 射线更强。

在 3 年里相继有三个重大发现，这决不是偶然的，它们使大家眼界打开了。过去以为原子是最小的不可再分的物质结构单元，现在新发现的电子却比最轻的原子——氢原子还要轻 1836 倍；过去以为除了可见光外的电磁波，只有无线电波、红外线和紫外线，现在却有了波长更短的 X 射线和 γ 射线；过去一个原子在化学变化中释放出来的能量不过几个电子伏（1 电子伏(eV) $=1.6\times10^{-9}$焦(J)），例如煤燃烧时，一个碳原子和二个氧原子化合($C+O_2\rightarrow CO_2$)，同时放出能量约 4 eV，而现在天然放射性现象中，一个原子放出的能量竟可以达到几百万电子伏，即几个 MeV($1MeV=10^6eV$)。就是说，天然放射性原子放出的能量比化学变化中放出的化学能要大一百万倍！不仅如此，人们知道化学变化不会引起原子性质的根本变化，碳在燃烧后，一个碳原子虽然与二个氧原子化合在一起，它基本上还是原来的碳原子，然而原子经过放射 α 或 β 射线之后却变掉了。如一个镭原子放出一个 α 粒子后，就变成一个氡原子(一种惰性气体的原子)而跑掉了。这一切当然是十分惊人的，原来在肉眼看得见的“宏观”世界之内，存在着一个十分丰富多彩的肉眼不能直接看见的“微观”世界，通过电子、X 射线和放射性的发现，人们打开了这个微观世界的窗户，窥探到一些奥秘，但是还莫测高深。于是，从那时候起，各国的物理学工作者便加紧从这个新的方向去进行研究，从而把物理学从 19 世纪的经典物理学阶段推进到 20 世纪的近代物理学阶段。可以说，三大发现揭开了近代物理的序幕。

序幕还不是高潮。从 1900 年起，在物理学研究中波澜迭起，这里我们先把 1911 年原子核的发现提前介绍一下，以便将研究的对象明确起来。

天然放射性中 α、β 或 γ 射线从原子中带走了很高的能量，而另一方面原子在化学变化中释放的能量又很低。由此推断，α

粒子、β粒子(电子)和γ射线看来不可能是由于原子的化学变化而放出来的，那么，它们是从原子深处的哪一部分跑出来的呢?

在电子发现之后，汤姆孙就提出过一个原子结构模型。他认为原子中的负电荷完全集中在电子上，而正电荷仍然是连续分布的。一个原子序数为 Z 的原子，就是一个带有 Z 个(单位为 e)正电荷的球状流体，内部有 Z 个点状的电子，分布在准确的对称位置上。当这些电子静止在平衡位置上的时候，原子是稳定的；当电子偏离各自的平衡位置时，它们就会振动起来，这样原子便发出光。汤姆孙的原子模型是一种很机械的模型，有人叫它"葡萄干蛋糕"模型，它实际上并不能解释原子的发光，更无法说明原子何以能放出高能的α、β或γ射线，问题太多，很难使人接受这种原子模型。

如何解决原子的结构问题呢？只有靠新的实验手段去变革原子，才能去认识它。1911年，出生于新西兰的英国物理学家卢瑟福和他的合作者，设计了一个实验，用天然放射性源中放出来的高速α粒子(速度 $v \approx 2 \times 10^9$ cm/s)去轰击很薄的金属箔(例如厚为0.0004 cm的金箔)，用硫化锌(ZnS)的荧光屏去观察α粒子被散射到各个方向的分布。实验发现：大部分粒子透过去了，或者偏转了一个很小的角度，但还有极小一部分(约8000分之一)α粒子却偏转了一个很大的角度(超过90°)，有一些甚至接近180°，即几乎是反弹回来。按照汤姆孙模型，α粒子的偏转都应该很小，理由是：原子整体上是电中性的，只有当α粒子进入原子内部后才受到电力的作用，但α粒子质量大、速度快，原子内带负电的电子很轻，它对α粒子的作用不足以改变后者的运动方向，而原子内的正电荷分布又很均匀、很分散，也不能显著改变α粒子的运动方向，于是α粒子应该长驱直入，经过几千层的金原子之后，平均偏转也不过1°左右。

卢瑟福他们增加箔的厚度，发现大角度散射的α粒子数目

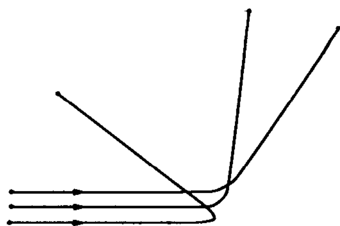


图 8.3　大角度偏转的 α 粒子

也随之增加，这是一种“体积效应”。最后卢瑟福断定，大角度偏转的 α 粒子必定受到了一次强有力的碰撞（图 8.3）。因此他假定原子内的正电荷不是分散在原子半径（10^{-8}cm）的大范围，而是集中在原子中心的一个半径极小的球体积内，这个小球，就称为原子核。由此分析向各个角度散射（尤其是大角散射）的 α 粒子数目，与实验完全一致，并且可进一步测出原子核的半径不超过 10^{-12} 厘米，即不到原子半径的万分之一；同时证明原子核所带正电荷为 Ze，Z 就是该元素的原子序数。

于是新的原子结构模型——原子的行星模型产生了：原子核犹如一个太阳系的中心——太阳，Z 个电子则像九大行星那样绕“日”运行。原子核只占原子中空间范围的极小一部分，但却占有了原子质量的极大部分。我们现在还常常看到宣传画上画着这样的原子模型，但以后我们将逐渐说明，它只是人们认识原子结构的一个阶段，随着科学的发展，必须代之以更深入的认识。

一种元素的化学性质是由原子序数 Z 决定的，Z 就是原子核外的电子数目，现在看到，它也是原子核所带的正电荷的数目，所以一个原子的性质主要由它的核性质所决定。原子的电离乃是它的核外（外层）电子增减的过程，原子核并没有发生变化，在化学变化中情况也是类似的。比如说，一个氧原子 $Z=8$，核内有 8 个正电荷，核外有 8 个电子，当它从外面拉来两个电子，便变成了氧的负离子（O^{2-}）；一个氢正离子 H^+，就是失去电子的氢原子，即氢原子核，以后叫做质子；一个氦原子失去它的两个电子后也只留下一个核，它就是 α 粒子；等等。人们很快就明白，α、β、γ 等天然放射性都是从原子核内放出来的，这意味着

核内蕴藏着巨大的能量。所谓"原子能",其实是"原子核能",我们以后将专门讨论。

从以上简短介绍已可看出,19 世纪末到 20 世纪初这段时间,确实是物理学的一个转折关头,许多物理工作者激流勇进,做出了重要的贡献。

8.2 相对论简介

8.2.1 伽利略相对性原理和坐标转换

自古以来,空间概念来源于物体的广延性,时间概念则来源于过程的持续性,我国战国时期的著作《墨经》上说:"宇:弥异所也","久:弥异时也"。这里"宇"是空间的总称,"久"是时间的总称。"弥"是普遍的意思"弥异所"即"不同地点的总称","弥异时"即"不同时刻的总称",这是从具体过程中抽象出来的空间、时间概念。牛顿基本上也是这种观念,他把空间-时间看作为物理事件的载体或框架,一切事件都相对于它们而用空间坐标和时间坐标来加以描述。具体地说空间既作为物质世界位置性质的表现,又作为容纳一切物质客体的容器。在这两种空间概念的结合上,牛顿作了更进一步的假定,即在空时坐标的参考系中,存在一种优越地位的"惯性系",对于它来说,物体运动遵从惯性定律,即不受力(远离其他物体的相互作用)的物体保持其原有的静止或匀速运动状态。当物体受力 F 时,按牛顿定律 $F = ma$ 产生加速度 a,这时的加速度是相对于惯性系的坐标来定义和测量的。因此,在牛顿力学中,空间和时间不仅被看作为同物质一样的独立存在,而且还扮演了某种具有绝对意义的角色,它作为一种惯性系作用于一切物质客体。

与地球表面相连的参考系可看成是近似的惯性系,但地球除自转外,还以 30 km/s 的速度绕太阳运动,因此,看来太阳系是更好的惯性系。但是,重要的是:即使是严格意义下的惯性系

也不止一个。下面我们来说明这一点。

让我们在一只平稳地航行着的船上做一个自由落体实验，如图 8.4 所示。虽然船以速度 v 相对于地面在作匀速运动，但自由下落的水滴始终正好落在水滴正下方的盆里，不会因为船的匀速运动而向后偏斜。

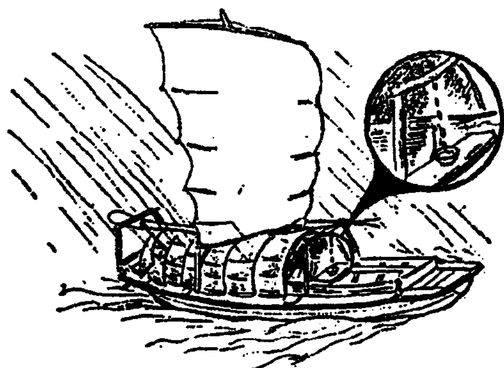


图 8.4　伽利略的自由落体实验

1636 年，意大利科学家伽利略写道："……你可以使轮船以任何速度航行，只要它是在作匀速直线运动，你就一点也不会觉出前面所说的一切动作有任何改变，你也不能根据这些运动中的任何一个来判断轮船是在航行或是停泊着不动。……你掷一样东西给一个人，假如他是在船头，你是在船尾，你不要用比你们两人处于相反位置上所用的更大的劲去掷那样东西。水滴仍会落在盘子底上，一滴也不会斜向船尾那个方向落下来，尽管当水滴还在空中的时候，船已经朝前行进……"这里，伽利略已经明确地指出，不论做什么力学实验，都不能判断船相对于地球的匀速运动状态。而当船处于加速（或减速）状态中，则因水滴下落时向后（或向前）偏斜，人们是能够判断出自己是处在加速（或减速）状态中的。如果承认地球表面是惯性系，那么匀速运动的船同样也是一个惯性系（不论速度大小）；但加速的船则不是一个惯性系，而是一个非惯性系。于是，我们可以归纳出两点

相互密切联系的结论：

(1) 相对于一个惯性系作匀速直线运动的参考系也是一个惯性系；

(2) 在一个惯性系内通过一切力学实验都不能判断这个惯性系相对于另一个惯性系的匀速运动状态。

如一惯性系(记为 K')相对于另一个惯性系(记为 K)的速度为 v，若一物体相对于 K'的速度为 u，则它相对于 K 的速度为 $u \pm v$("+"或"−"分别对应于 u 和 v 平行同向或反向的情况)。

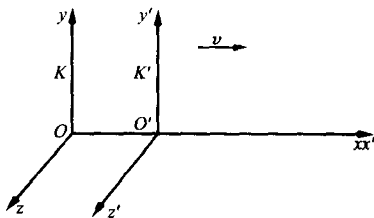


图 8.5　惯性系 K 和 K'

为了描述质点的运动，让我们取两个相互作匀速直线运动的惯性系 K 和 K'，它们的 x 和 x' 轴沿着运动方向，y 和 y' 轴、z 和 z' 轴平行，则空间一点 P 的坐标在 K 系中表示为(x, y, z)，在 K' 系中表示为(x', y', z')，如图 8.5 所示。它们间有如下的关系：

$$\begin{cases} x = x' + vt \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

在这里已假定在 $t = 0$ 时刻，K' 系的原点 O' 和 K 系原点 O 重合；另一个非常重要的假定：K' 系的时间 t' 和 K 系的时间 t 是一样的，即

$$t = t'$$

这意味着，K 系的观察者和 K' 系的观察者可以共有一只钟，这和空间坐标不同，时间坐标是绝对的。合起来叫做伽利略变换，

它把两个惯性系间的空间、时间坐标联系起来了。

从伽利略变换很容易推出经典力学的速度相加定理。如一质点沿 x 轴作匀速运动,在第一式的两端各除以 t,因为 $\frac{x}{t}=u$ 是质点相对于 K 系的速度,而 $\frac{x'}{t'}=u'$ 是它相对于 K' 系的速度,故

$$u=u'+v$$

另一方面,也很容易证明物体的力学运动规律,即牛顿方程 $F=ma$,在伽利略变换下是不变的。这句话的意思是方程的形式在 K 系和 K' 系相同。

8.2.2 迈克耳孙实验与洛伦兹解释

17 世纪上半叶笛卡儿最早提出了“以太”(aether)假设。他认为在宇宙空间充满着极细微的粒子,在一定的距离上两个物体之间的相互作用是通过“以太”传递的。随后,光的波动说的倡议者惠更斯提出光是“以太”的振动。他说:“光是发光体微小粒子的振动在‘以太’中的一种传播过程”。

19 世纪上半叶,法国物理学家菲涅耳(Fresnel)提出静态“以太”理论,他认为充满在宇宙中的“以太”是绝对静止的。这样,“以太”就成为了牛顿的绝对静止参考系的物质承担者。按照菲涅耳的拖引假设,当物体以速度 v 相对于“以太”运动时,物体中的“以太”被曳引着走,它相对于静止以太的速度为

$$\left(1-\frac{1}{n^2}\right)v$$

因为空气的折射率 $n=1$,所以随着地球一起运动的空气,应不曳引以太,因此大气中的以太是静止的,不受地球运动的影响。这样对于地球上的观察者来说,将有以太风存在。

在 19 世纪后半叶,探索以太风的存在,确定地球和以太的相对运动就成为物理学发展中一个突出的问题。早期的以太漂移实验是在精确到 v/c 一级效应的范围内进行的,通过实验未

观察到地球运动对光学现象的任何影响。那么，这些以太漂移实验的零结果，是不是就否定了静止以太的存在呢？相反，不仅没有否定，而且还巩固并加强了人们的静止以太观念，因为这些实验结果都用菲涅耳的拖引假设得到了充分的证明和解释。

1887年迈克耳孙(Michelson, 1852—1931)和莫雷(Morley, 1838—1923)用他们自己发明的干涉仪作了以太漂移二级效应实验。如图8.6和图8.7所示，从光源S发出的黄色光被半镀银镜M分成两束，光束1被镜M_1反射回到M。光束2被镜M_2反射回到M。然后光束1被M反射，光束2透过M，在T处会合并产生干涉条纹，以太的漂移速度为v，沿MM_1方向光速为$c-v$，沿M_1M方向光速为$c+v$，沿MM_2和M_2M的光速为$\sqrt{c^2-v^2}$，则光束1从M到M_1，光束2从M到M_2的往返时间分别为：

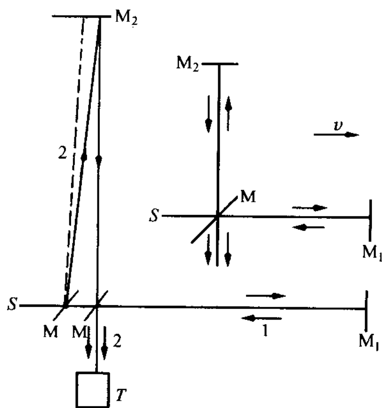


图8.6 迈克耳孙和莫雷实验

$$t_1=\frac{L}{c-v}+\frac{L}{c+v}=\frac{2L}{c}\left(\frac{1}{1-v^2/c^2}\right)$$

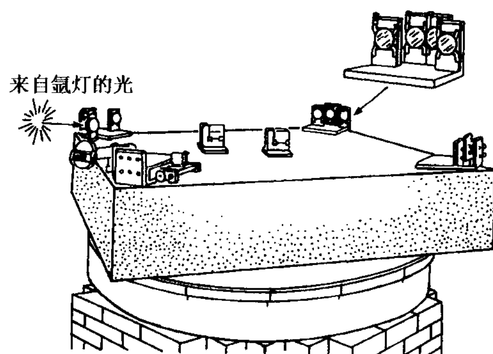
$$t_2=\frac{2L}{c}\left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)$$

仪器转动90°所引起的两光束的时间差的变化为

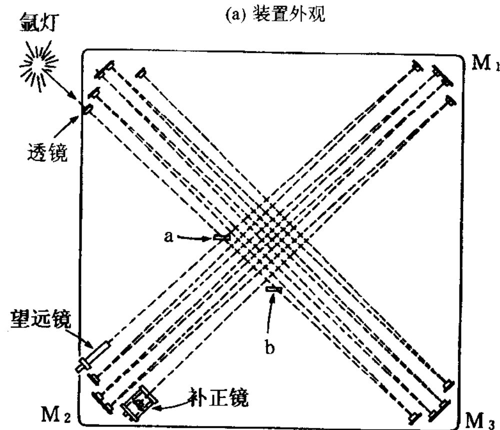
$$\Delta t=2(t_1-t_2)\approx\frac{2Lv^2}{c^3}$$

预期的干涉条纹的移动量为

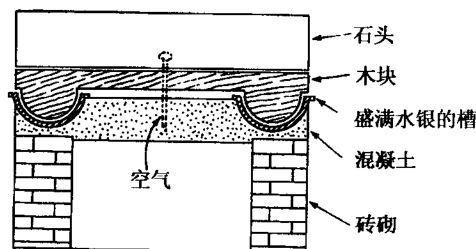
$$\delta=\frac{c\Delta t}{\lambda}=\frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$$



(a) 装置外观



(b) 俯视图



(c) 剖面图

图 8.7　迈克耳孙实验装置图

取 $L=11\,\mathrm{m}$、$v=30\,\mathrm{km/s}$、$\lambda=5.89\times10^{-3}\mathrm{m}$ 代入，估计可以测得 $\delta=0.4$ 个条纹移动。但是，迈克耳孙和莫雷进行观察时却看不到这样的移动。

迈克耳孙对这一实验结果感到十分失望，但并没有动摇对以太说的信赖。他用拖动假设来解释，认为地球运动时，地球表面的以太并不保持静止，而是随地球一起运动，因为这一解释与光行差现象有矛盾，所以不为世人所接受。迈克耳孙是不喜欢相对论的，他对自己的工作会引出这样的一个怪物感到懊悔，直到晚年他还留恋他的"可爱的以太"。

由于这一实验与静止以太论不相容，所以，引起了物理学界的震惊。但是有的书把这一实验说成是相对论赖以产生的判决实验就不妥了。从当时的历史实际来说，人们对菲涅耳的理论是极为信赖的，不少人认为迈克耳孙-莫雷实验失败了，其理由是看不到预想的结果。总之，谁也没有据此作出判断菲涅耳的静止以太被否定了。

1892 年，荷兰物理学家洛伦兹（Lorentz, 1853—1928）提出了"收缩假设"来解释"以太漂移"实验的零结果。他假定物体在运动方向的长度有收缩效应，如果收缩的因子是 $\sqrt{1-v^2/c^2}$，便能得出条纹移动量的零结果。洛伦兹从物质结构上来解释长度收缩，他认为这种收缩是由物体内部的分子力引起的。他假定分子力像电力和磁力一样通过以太而传递，由于物体的平移可能影响分子力，从而使物体大小发生变化。

同年，洛伦兹发表了《麦克斯韦的电磁理论及其对运动物体的应用》的论文，着手研究运动物体的电动力学问题。在赫兹发现电磁波后，洛伦兹明确地接受了麦克斯韦关于场的概念。他首先把以太和有重量的物质鲜明地区别开来，认为以太是电磁场的载体，以太就是作为电磁场而存在。他假定静止以太充满整个宇宙空间，物体中大量上的带电粒子是电磁现象的源泉，空间每一点以太的状态由麦克斯韦方程来描述。

为了研究运动物体中的电磁学规律，最方便的办法当然是

把电磁力的基本方程变换到运动参考系中来。按洛伦兹的理论麦克斯韦方程在静止以太参考系中是成立的;但实验顽强地显示出地球运动的一阶和二阶效应为零,这可能是根本不存在这种效应,也可能是被其他效应所补偿。无论如何,平移参考系中的电磁学规律的形式应当和静止系中一样。

从1892年至1904年,洛伦兹探讨了相互作匀速运动的参考系中的坐标变换式和电磁场变换式,经过十多年的努力他得到了现在所用的洛伦兹变换式。按照这套变换式在运动参考系S'中和在静止参考系S中的麦克斯韦方程具有相同的形式,他称这些方程是协变的(covariant)。所以在S'系和S系中的电磁规律和光学规律是相同的。他把这一结果称之为"对应态原理"(Theorem of Corresponding States),对于一个以电场强度$\boldsymbol{E}$和磁场强度$\boldsymbol{B}$为特征的系统的状态,它们对(x, y, z, t)的函数,在S'系中和S系中具有相同的形式。这就回答了地球运动对光学现象没有影响的问题,说明在地球上所作的任何光学和电学的实验不可能发现地球相对于以太的运动。

虽然洛伦兹提出了变换方程,但他是先验地提出这组方程,而且把变换方程作为一种纯粹的数学手段,他把变换出来的坐标(x', y', z', t')中的t'叫做"地方时"(local time),并认为它只不过是个数学的辅助量,而不是真正的时间,他认为真实的,普遍的空间和时间坐标是相对于静止以太参考系的坐标。但是,也有些科学家作了其他方面的思考,这里先介绍庞加莱的相对性原理。法国数学家、物理学家庞加莱(H. Poincaré, 1854—1912)1895年在研究拉莫尔(J. Larmor, 1857—1912)电磁理论的论文中,首次出现了反对绝对运动的提法,他在那里说:"从各种经验事实得出的结论能够概括为下述断言:要证明物质的绝对运动,或者更确切地讲要证明可称量物质相对于以太运动是不可能的"。1899年,在巴黎大学的讲演中,当他描述了当时所作的一系列测量地球相对于以太运动的一阶、二阶实验没有产生任何效应后,他说:"我认为光学现象很可能只取决于物体、光

源和所涉及的仪器的相对运动,不只是到二阶的量,而且到更加精确的量也是对的"。这就是说,在1899年庞加莱相信在原则上绝对运动是不存在的,只有相对运动才有意义。

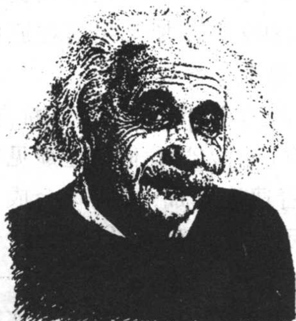
庞加莱还敏锐地预感到一种新的力学即将出现,他断言:"也许我们应该建立一门新的力学,对这门力学我们只能窥见它的一鳞半爪,在这门力学中,惯性随着速度增加,光速将会成为一个不可逾越的界限。"这段话既显示了庞加莱直觉的力量,也显示出他对新力学的见解具有定性的性质。

1906年,庞加莱在他的《论电子的动力学》中写道:"从实验上证明地球的绝对运动的不可能性是自然界的普遍的规律。相对性假设(Postulate of Relativity)是成立的而且是普遍有效的。无论这个假设迄今是与实验相一致,还是以后被更精确的实验进一步证实或被推翻,在任何情况下看到这一假设所得出的结果都是有趣的。"但是,尽管这样,洛伦兹、庞加莱都没有把相对论提出来。1915年,洛伦兹在总结自己没有提出相对论的原因时说:"如果我现在必须写最后一章,我一定给予爱因斯坦的狭义相对论一个更为重要的地位,根据这一理论,运动系统电磁现象的理论达到了我没有获得的简明性。我失败的主要原因是我墨守这一概念,只是把时间 t 认为是真实的时间,而把我的地方时间 t' 充其量不过看作是一个数学辅助量而已。"

爱因斯坦对洛伦兹的贡献作了高度评价。1907年,他说:"狭义相对论是洛伦兹理论和相对性原理的结合。"1955年,他在致C. Seelig的一封信中写道:"毫无疑问,如果我们回顾狭义相对论的发展,那么它在1905年发现的时机已经成熟,洛伦兹已经看到为了分析麦克斯韦方程,那些后来以他的名字命名的变换方程是必不可少的。庞加莱甚至已经识破这些联系。"

8.2.3 爱因斯坦相对论的建立

爱因斯坦一直坚持工作的连续性这一观点,他对他的前辈和同时代人的工作都是充分肯定的,英费尔德(Infeld)在他写的


爱因斯坦(1879—1955)

《相对论的发展史》中叙述了他与爱因斯坦在普林斯顿的一次谈话："我对爱因斯坦说：'在我看来，即使您没有建立它，狭义相对论的出现也不会再等多久，因为庞加莱已经很接近构成狭义相对论的那些东西了。'爱因斯坦回答道：'是的，这说得对。'"

1905年建立狭义相对论的历史条件已经成熟，走到狭义相对论门前的人中，有洛伦兹、庞加莱、爱因斯坦，无论就学识的渊博和数学水平来讲，洛伦兹、庞加莱都比爱因斯坦强，但为何不是由他们建立狭义相对论，而是由"初出茅庐"的爱因斯坦建立狭义相对论呢？这要从少年时代的爱因斯坦谈起，他从小就有发散的思维，很早就萌发了相对论的思想，1895年，当他16岁在瑞士阿劳中学念书时，曾在无意中想到一个追光的假想实验，他想："如果我以速度 c 追随一条光线运动，那么我就应当看到，这样一条光线就好像一个在空间里振荡着而停滞不前的电磁场。可是无论是依据经验，还是按照麦克斯韦方程，看来都不会有这样的事情，从一开始我直觉地看来就很清楚，从这样一个观察者来判断，一切都应当像一个相对于地球是静止的观察者所看到的那样按照同样一些定律进行。"这是与狭义相对论有关的"第一朴素的理想实验"。

1890年，赫兹在写出静止以太参考系中的波动方程时，明确指出波速 c 与波源的运动速度无关。洛伦兹在探讨运动参考系中的波动方程时，始终把光速不变性作为一个限制条件，作为他写出的变换式是否正确的准绳。所以爱因斯坦在《相对论的基本思想》中指出："从麦克斯韦-洛伦兹电动力学出发，这个理论采纳了光速不变定律(光速不变原理)。"

洛伦兹在确立他的变换方程时，除了要满足光速不变性的

要求外，还要满足协变性的要求，即用洛伦兹变换式来计算从一个惯性系转移到另一个惯性系的变化时，必须要求物理学的一切方程都不改变它们的形式。爱因斯坦在《相对论发展简述》中说："洛伦兹理论的重大价值在于使静止物体和运动物体的全部电动力学回到了空虚空间的麦克斯韦方程。"这句话的意思就是说运动参考系与静止参考系中的麦克斯韦方程具有相同的形式。

但是洛伦兹理论在一个"有根本重要意义的地方"使爱因斯坦感到不满，"比起别的运动参考系来，它给以太静止参考系以突出的地位"，在这一点上，这个理论与相对性原理相对立，而爱因斯坦对相对性原理是确信不疑的。他认识到，一切经验，包括电动力学领域里的一切经验(特别是迈克耳孙实验)都支持一切惯性系的等效性这个概念，也就是说都是支持相对性原理的。

对于迈克耳孙实验的零结果，爱因斯坦说："……我知道迈克耳孙实验的奇怪的结果。不久我得到这个结论：如果我们承认迈克耳孙的零结果是事实，那么地球相对以太运动的想法就是错的，这是引导我走向狭义相对论的最早想法。自那以后，我认识到虽然地球在环绕太阳运动，但地球运动不能由任何光学实验检验出来。"

当迈克耳孙实验的零结果使一些物理学家感到震惊和迷惘，忙于修补以太论的时候，爱因斯坦却得出"地球相对于以太运动的想法是错误的"结论。这与他在"追光"中的思想是一脉相承的。因为在那时他就直觉地相信在相互作匀速运动的参考系中所看到的物理现象都按同样的定律进行。

为什么说"追光"是引导他走向狭义相对论的最早的想法呢？这是因为在"追光"中他是"直觉地清楚的"，而这时是从观察实验中得到结论，比过去对相对性原理的认识就更加具体、更加巩固。但迈克耳孙实验对他原有的观念并没有引起很大的变化，只是使他对之更加自信而已。

年轻人相聚在一起的畅想、切磋，是学术研究中的一个很好的方法，在 1902 年至 1905 年期间，爱因斯坦在伯尔尼结识了索

洛文(M. Soloivne)与哈比希特(C. Habicht),三个青年组成了"奥林比亚科学院",他们每晚聚集在一起以极大的兴趣和热情研读了斯宾诺莎(Spinoza, 1632—1677)、马赫、休谟(D. Hume, 1711—1766)、亥姆霍兹、黎曼、庞加莱……等人的科学与哲学著作。从这些大师们的经典著作中,爱因斯坦吸取了许多人类思想的精华。斯宾诺莎关于自然界的统一性观念对爱因斯坦有深刻影响,他曾经声称:"我信仰斯宾诺莎的那个在存在事物的有秩序的和谐中显示出来的上帝,而不信仰那个同人类的命运和行为有牵累的上帝。"即他相信世界的统一。正是因为他对自然界的统一性具有强烈的深挚的信念,所以他在1905年发表的几篇文章,具有同一风格,在文章的起始都提出了不对称性问题,即统一性遭到破坏的问题。马赫对牛顿的绝对时空观提出的批评以及休谟的时空观点,这些都为爱因斯坦在潜意识中放弃时间的绝对性或同时性的绝对性概念打下了基础。有了这样一个基础,相对性原理与伽利略变换之间的矛盾就有了解决的途径。

爱因斯坦1922年在京都大学的讲演中,生动地描述了这一矛盾的解决过程:"1905年4月的一天,天气很好,我带着这个问题(光速不变性概念与速度合成法则的矛盾)去访问我在伯尔尼的一位朋友贝索(Michele Besso)。开始,我告诉他:'近来,我遇到一个难题,今天到这儿来,请你和我一块攻攻它。'我们讨论了这个问题的各个方面。后来我突然找到了问题的关键。第二天,我又来访问他,甚至没有问候一声就对他说:'谢谢你,我已经完全解决了这个问题。'我的解决办法是,不能绝对定义时间与信号速度之间有不可分的联系,使用这个新概念,我第一次圆满地解决了整个问题。"

为了解决这些矛盾,经过一段时间的思考,1905年6月,爱因斯坦在《论运动的电动力学》这篇论文中抛弃了"以太"的概念,并提出了两个基本假设作为狭义相对论的基本原理:

(1) 狭义相对性原理

这个原理是力学相对性原理的推广，它的内容为：在一切惯性坐标系内，各种物理学的规律都是相同的，即在惯性系内，不能通过物理实验来判断该惯性系是静止还是匀速直线运动。

(2) 光速不变性原理

这个原理的内容为：在真空中，光速与光源或接受器的运动无关，在各个方向都等于一个恒量 c。这就是说，在相对于光源作匀速直线运动的一切惯性系中所测得的光速都相同。

第一条原理称为爱因斯坦相对性原理，它表明物理规律在所有惯性系都是相同的，或者说一切惯性系都是等价的。这一原理是力学相对性原理的推广，使相对性原理不仅适用于力学现象，也适用于电磁现象以及所有物理现象。

第二条原理称为光速不变原理，它表明在任何惯性系中，光在真空中的速率都相等，或者说光速与光源和观察者的相对运动无关。这一结论来自于电动力学的成果，它也为很多精确的实验和观察所证实，特别是为著名的迈克耳孙实验所证实。

正是在这两条原理的基础上，爱因斯坦建立起一套完整的理论——狭义相对论，而把物理学推进到了一个新的阶段。

下面，将爱因斯坦相对论得出的结论作简单的介绍。

同时的相对性

设想前苏联和美国的两艘宇宙飞船在宇宙空间以相对速度为 $c/2$ 相向而行，在某时刻相遇的情景，以此来作说明。这两艘宇宙飞船长度相同，在首、尾都装有一个能接收光信号的接收器，我们称其为“光钟”，在飞船中部都有一个光信号发射器，当两飞船中部相遇重叠时，信号发射。如图 8.8 所示，左列四图是美国飞行员所看到的现象，右列四图则是苏联飞行员所看到的现象，他们的结论分别是：美国飞行员说：“光信号从中间发出后，同时到达我的飞船的前后两个光钟，而不是同时到达苏联飞船上的两个光钟”，而苏联飞行员则说：“光信号从中间发出后，同时到达我的飞船的前后两个光钟的，而不是同时到达美国飞船的两个光钟”，究竟谁正确呢？

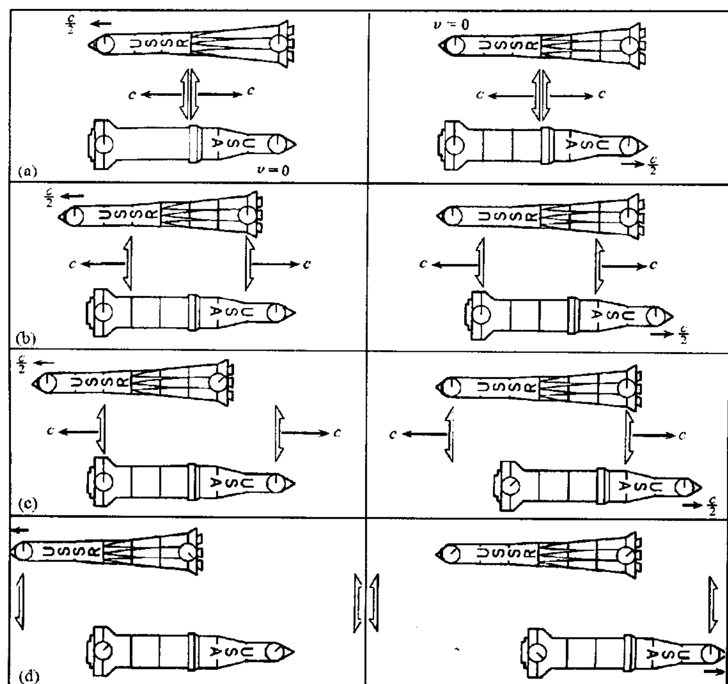


图 8.8　不同宇宙飞船上的观测结果

爱因斯坦认为：他们两个都对。他们得出的结论之所以不同是因为他们分别处于不同的参考系。发生在同一地点（同一参考系）的两个事件的时间顺序是能绝对确定的，但是发生在不同地点（不同参考系）的两个事件的“同时性”不是绝对的，而是一个相对的概念，没有一个绝对的，通用于一切惯性参考系的“钟”。

洛伦兹变换

爱因斯坦新的时空观和伽利略的绝对时空观是完全不同的，而作为爱因斯坦相对论基础的新的实验事实是光速在一切惯性系内都各向同性，并为相同数值，简单的示意图见图 8.9。由此可得，新的时间-空间理论一定包含新的时空坐标变换关

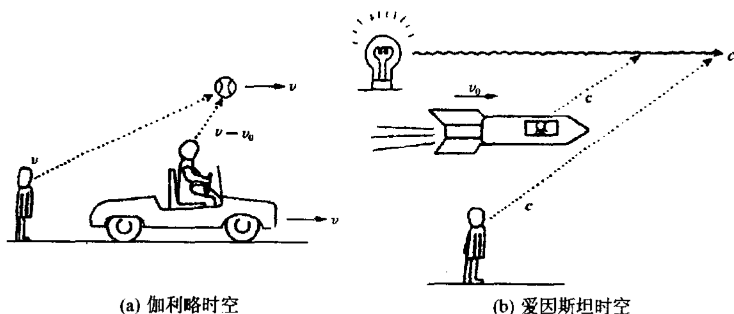
系，这就是由相对论所推得洛伦兹变换关系式，结合图 8.5 来讨论可得，K 和 K' 坐标系中应有下列关系：

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

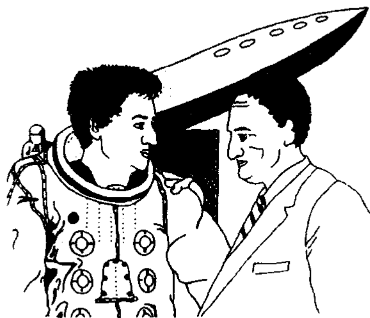
$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



(a) 伽利略时空　　(b) 爱因斯坦时空

图 8.9　表示两种坐标系变换原理的示意图

以上就是发生在同一客观时空点的“事件”反映在两个惯性系中时间-空间坐标之间的变换关系，是洛伦兹变换。由洛伦兹变换很容易导出运动物体长度收缩，运动时钟变慢的运动效应，当然，这种运动效应只是在速度很大的情况下才显著地反映出来，若 $v \ll c$ 时，洛伦兹变换就可用伽利略变换来表示了。有人提出了所谓“双生子佯谬”的问题，说的是当孪生兄弟中一个从宇宙飞行中归来，是否



孪生兄弟佯谬图

会不一样年轻的问题。

狭义相对论动力学

经典力学在伽利略变换下是不变的。运动粒子的质量 m_0 是一个不随时间(也不随速度)而变的常量,经典力学的动力学方程为

$$\boldsymbol{F}=m_0\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{v})=m_0\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m_0\boldsymbol{v})=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}$$

而由相对论可得

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

式中 m_0 是物体静止的质量,称为静止质量,m 是物体以速度 v 运动时的质量。上式被称为质速关系。令上式中 $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}=\gamma$,$\gamma$ 与 v 的关系如图 8.10 所示。

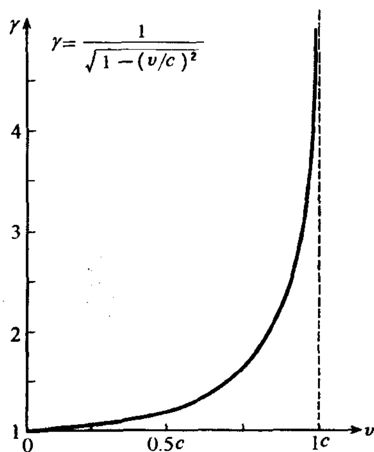
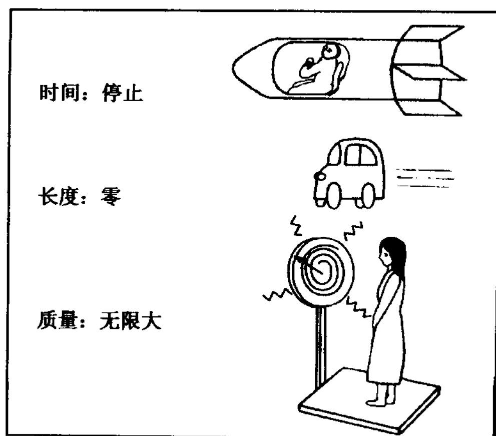


图 8.10 γ 和 v 的关系

由于质量是随着 v 而变的,则又有狭义相对论的动力学方程如下:



当 $v \to c$ 时的情况

$$F = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(mv) = v\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t} + m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

v 越大，m 就越大，因而加速度 $a = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$ 就越小，所以对一个已接近光速的粒子来说，受到外力时，与其说是增加速度 v，不如说是增加质量 m。

$m = m_0\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$，若对 $\frac{v}{c}$ 来展开时，由于 $\frac{v}{c} < 1$，将 $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$ 按级数展开，质速关系可写成：

$$m = m_0\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \cdots\right)$$

则

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2}m_0 v^2 + \cdots$$

这样，在略去高次项的条件下，一个运动着的物体的总能量 $E = mc^2$，可以分成两项，一是运动的动能 $E_k = \frac{1}{2}m_0 v^2 (v \neq 0)$，另一项是静止($v = 0$)时也有的能量，叫做静能 $E_0 = m_0 c^2$，即

$$E = E_0 + E_k$$

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2$$

这就是相对论动能公式，而 $E = mc^2$ 则是质能关系公式。

这个质能相互联系的规律，在相对论之前，没有被人们所注意，现在可以看到，如果从一个物体中放出一点东西使它的质量减少 Δm，那么将会放出 Δmc^2 的能量，而 c^2 是一个非常巨大的数值，也就是将会释放出非常巨大的能量来，这就为原子弹、氢弹的制造奠定了理论的基石。

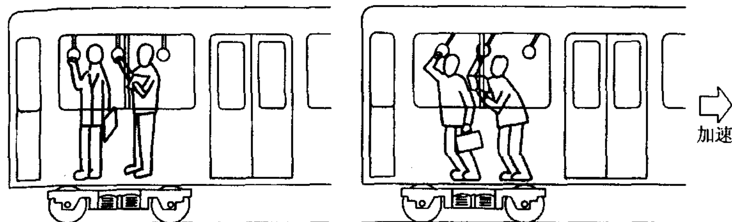
例如在核反应中若以 m_{01}，m_{02}分别表示反应粒子和生成粒子的总静止质量，E_{k1}和 E_{k2}分别表示反应前后的总动能，则我们应有 $m_{01}c^2 + E_{k1} = m_{02}c^2 + E_{k2}$，整理后则有

$$E_{k1} - E_{k2} = (m_{01} - m_{02})c^2$$

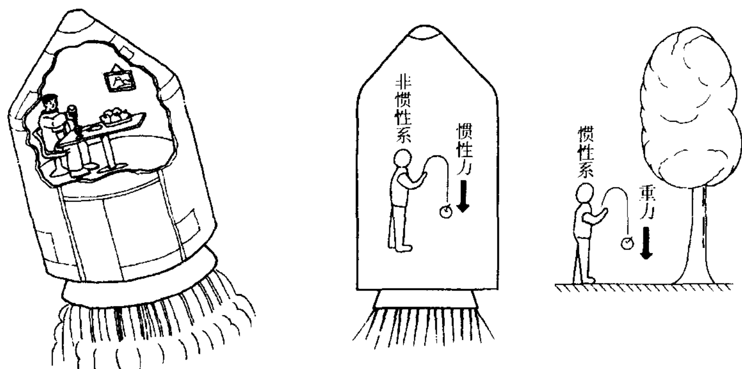
则

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

爱因斯坦在提出狭义相对论不久就感到这个理论存在着一个严重的缺陷："只把相对性原理，即认为自然规律同参考系无关这一假设应用于非加速参考系。是否可以设想相对性原理对相对作加速运动的参考系也仍然成立。"他自己还提出："……我认识到，除了引力定律以外的一切自然现象都能借助狭义相对论加以讨论。我非常想弄明白其中的原因……使我不能满意之处是，虽然惯性和能量之间的关系已经如此美妙地从狭义相对论中推导出来，但惯性和引力之间的关系却没能得到说明。我



匀速运动系　　　　列车加速运动产生惯性力



火箭喷射时可能产生重力　　　　惯性力和重力的区别

猜想这个关系是不能依靠狭义相对论来说明的。"为此，爱因斯坦把相对性原理推广到非惯性系，创立了广义相对论。

8.2.4 广义相对论提出的问题

引力质量和惯性质量的等同性

牛顿定律 $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ 中定义了反映物体运动惯性的物理量——惯性质量，而在万有引力定律 $F = \frac{GMm}{r^2}$ 中又引进一个反映物体相互间受到或产生引力的能力的物理量——引力质量，以上两者是从不同的实验基础上得出的，应属概念互不相同的物理量，但爱因斯坦却提出两者是相等的，他说："广义相对论的创立首先是由于物体惯性质量同引力质量在数值上相等这一经验事实，对于这一经验事实，古典力学是无法解释的。"这一等价性可从图 8.11 看出，在升降电梯中有一个人托着一个苹果，若突然牵引钢丝断裂，电梯处于自由下落状态下，这时若把手抽掉时苹果仍然会停留在原来位置上，这样，爱因斯坦就提出了引力与惯性力等效或引力场与加速场等效的原理。

将加速度和重力相关的关系用到光学上去时，则会出现惊人的光的引力偏折现象，该结论由 1919 年在巴西和西非的两个

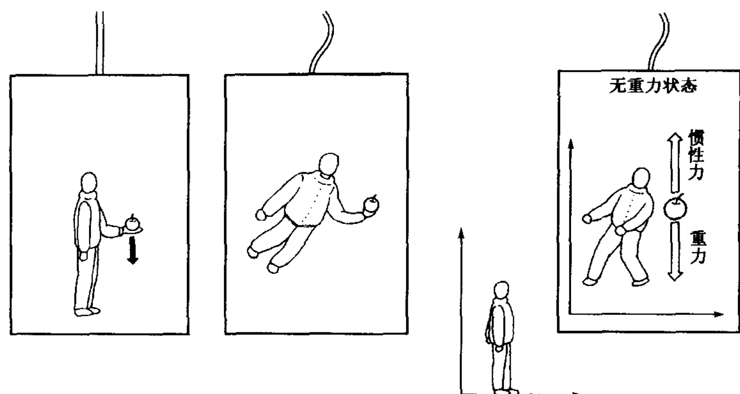


图 8.11

日食观测结果所证实(图 8.12)。由爱因斯坦的计算可得

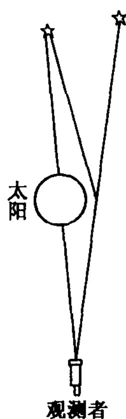


图 8.12

$$\Delta\theta = \frac{4GM}{R}$$

式中 R 为太阳半径，M 为太阳质量，G 为常数，计算出的 $\Delta\theta = 1.75''$，实测的为 $1.98'' \pm 0.12''$ 或 $1.61'' \pm 0.30''$。

由爱因斯坦相对论推得引力时间延迟效应，也由直接观测卫星和地球上的原子钟的时间之差得到证实(图 8.13)。已知地球质量 $M_e = 6.0 \times 10^{24}$ kg，地球半径 $R_e = 6.4 \times 10^6$m，假设卫星飞行高度为 10^4 km，由于引力势差 $\Delta\varphi$，卫星上的原子钟相对于地球上的原子钟频率显示的差值为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\varphi}{c^2} = \frac{GM_e}{c^2}\left(\frac{R - R_e}{RR_e}\right) = 4.2 \times 10^{-10}$$

卫星上的原子钟比地面上的原子钟“快”4.2×10^{-10}倍。1976年，曾发射过带有频率为1420 MHz 的原子钟的人造卫星。卫星上的原子钟与地面上一个同样的原子钟预先校准同步。当卫星远离地面一万公里时，已观察到卫星上原子钟相对地球上原子

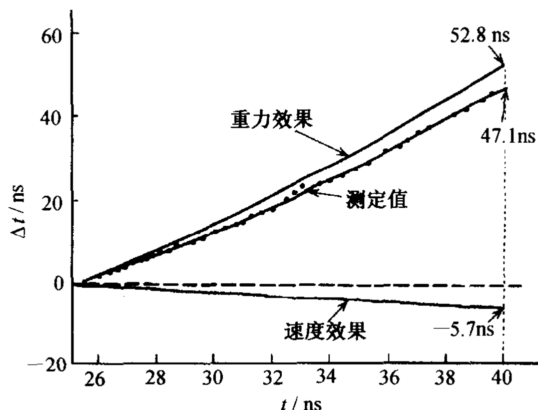


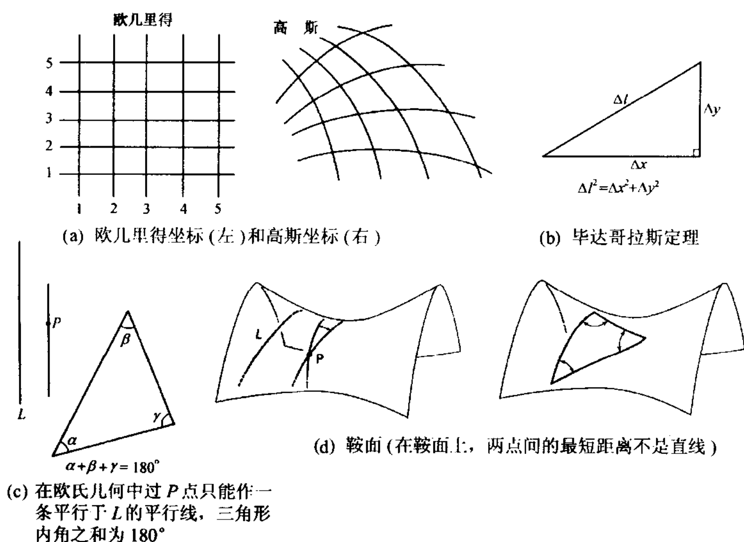
图 8.13 原子钟在飞行中延迟效应的测定
(重力效果和速度效果使时间的延迟与测定值一致)

钟频率变化 $\Delta\nu/\nu=4.5\times10^{-10}$,与理论计算符合得很好。

弯曲的时空

爱因斯坦又进一步对引力提出了革新的观点,他认为大质量物体(如太阳)将引起在其附近的时空几何学性质偏离欧几里得几何学,即我们所说的时空弯曲。在欧几里得几何学中两点间直线最短,在非欧几里得几何中并非如此,而从弯曲的四维时空所服从的非欧几里得几何性质看来,光线的偏折以及其他物体运行所遵循的路径恰恰是沿非欧几何的"短程线"进行的。鞍面上的两点间最短距离不是直线(图 8.14);球面上连接两点的最短距离是大圆的一部分(图 8.15)。

在欧几里得几何中,三角形内角和等于 180°,从图 8.14,图 8.15 上来看三角形三内角之和要比 180°大,这些与欧几里得几何的偏离都是由曲面造成的,爱因斯坦又借助于物质张量等建立起它们之间的联系,得到了引力场方程。因此,我们得出质量的存在及其运动与时空性质有着不可分割的关系,统一的时间、空间,因质量的存在,而变成了弯曲的结构。



(a) 欧几里得坐标(左)和高斯坐标(右)

(b) 毕达哥拉斯定理

(c) 在欧氏几何中过 P 点只能作一条平行于 L 的平行线，三角形内角之和为 180°

(d) 鞍面(在鞍面上，两点间的最短距离不是直线)

图 8.14 时空的弯曲

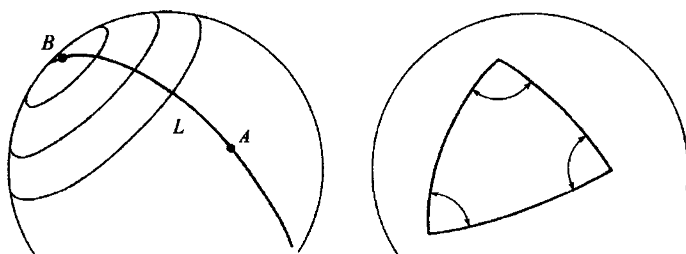


图 8.15 在球面上,连接两点的最短线是大圆的一部分

膨胀的宇宙

根据爱因斯坦的引力场方程,不少人做了研究工作,爱因斯坦本人先提出了一个认为宇宙是均匀的,又是各向同性的假定。在此基础上,他根据广义相对论提出了静态有限无边的宇宙模型,主张宇宙就其空间广延来说是一个闭合的连续区。这个连续区的体积是有限的,但它是一个弯曲的封闭体,因而是没有边界的,就好像一个球体的表面,虽然面积是有限的,但是沿着球

面运动却总也遇不到边。天体则均匀地分布在弯曲的封闭体中。爱因斯坦为了使静态有限无边的宇宙模型能符合动力学方程,特地修改了他的场方程,引进了一个具有斥力的因子,叫做宇宙项。他之所以决定引进宇宙项,完全是因为他相信,宇宙间的物质从大尺度来看,必定是静态的。

然而,事实的发展恰好相反,1922 年苏联数学家弗里德曼求出了爱因斯坦场方程的解,这种解不是静态的,而是均匀膨胀或均匀收缩的。并且指出,爱因斯坦的解是不稳定的,小的扰动就会破坏它的静态性质,使它过渡到膨胀运动状态或者收缩状态。弗里德曼的解是否与真实的宇宙相一致,有待于从对宇宙的观测上来回答。

美国天文学家哈勃(E. Hubble)在 20 世纪 20 年代分别对星系谱线的移动和星系到地球的距离进行测量,发现除极少数非常邻近的星系外,所有星系的谱线都向长波方向移动,即红移。如果用多普勒效应解释红移现象,那么,就意味这些星系都是向着远离我们的方向运动的。1929 年哈勃进一步发现,星系离开我们的退行速度与它们到我们的距离 r 成正比,即

$$v = H_0 r$$

这就是著名的哈勃关系。哈勃关系在视星等与红移的关系图上表现为直线(图 8.16)。因为所选择的这些星系具有相同的光度,所以它们的视星等与距离对数成比例。而另一方面,红移量又与退行速度成比例,所以视星等-红移图实际上也是一张距离-退行速度图,图中直线斜率就是上式中的比例常数 H_0,称为哈勃常数。它反映着宇宙的膨胀速度(图 8.17),其数值大约为 2.1×10^4 米·(秒)$^{-1}$·(百万光年)$^{-1}$。哈勃定律的重要意义在于它向人们描绘出一幅宇宙膨胀的情景,从任何一个星系上看,其他星系都离开它而退行(图 8.18,图 8.19),这类似于一个正在胀大的肥皂泡(二维曲面),星系间的距离越远,相对的退行速度越大。

红移现象的观测结果出现之后,爱因斯坦发现自己错了,他

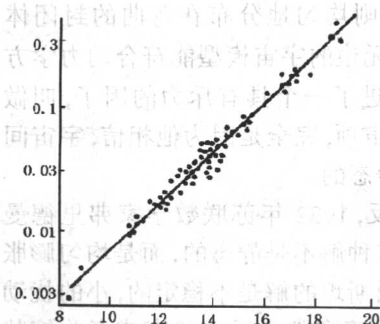


图 8.16　星系的视星等-红移关系图

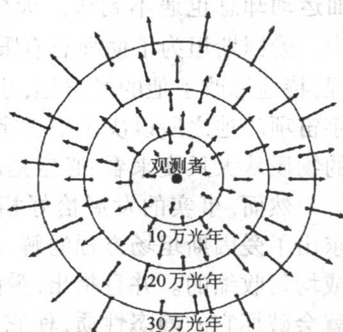


图 8.17　宇宙的膨胀

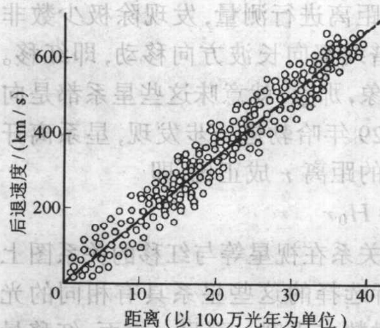
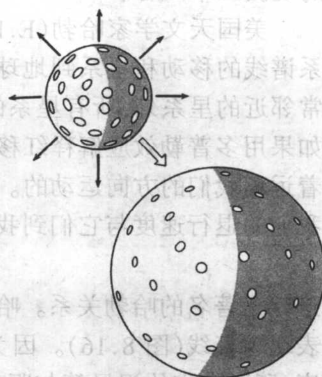


图 8.18　银河系退行速度与距观测者距离的关系


图 8.19　银河系本身也在高度分离扩展

曾经万分感慨地说过：引进宇宙项是他"一生中最大的错事"。因为爱因斯坦是以不轻信任何先验自明的概念著称的，竟没有注意到静态观也是个先验的东西。

由于认为宇宙是膨胀的，自然会使人们回溯宇宙的过去。如果宇宙中的物质总量一定，可以得出宇宙演变历史中愈往前宇宙中的物质愈密集，温度和压强也愈高的结论。这意味着在过去的某个时刻宇宙可能处于一个极高温度和极高密度的状态。1942 年美籍俄国人伽莫夫(G. Gamow)提出，约在 140 亿年

以前宇宙由一原始火球发生爆炸而产生，并开始膨胀，宇宙的密度和温度随之降低，直到今天的状态，这种宇宙模型被称为大爆炸宇宙学。

按照这个模型在大爆炸发生后的百分之几秒，宇宙温度下降到 10^{11}K，宇宙物质开始变成由我们熟悉的粒子——质子、中子、正负电子、正反中微子、光子等组成，它们之间相互作用很强，中子虽然不稳定，但质子与中子可通过诸如 $\nu_e + p \leftrightarrows e^+ + n$，$\nu_e + n \leftrightarrows e^- + p$ 等反应相互转化。随着宇宙的膨胀，温度下降，中子转变为质子的反应率将超过质子转变为中子的反应率，于是中子的含量将减小。到爆炸后 3 分钟左右，温度下降到 10^9K，中子占核子数的 14%，而质子约占 86%，开始形成原子核。中子和质子将迅速结合成氘核又结合成氦核。当几乎全部中子都已与质子结合成氦核时，氦的质量约占总质量的 28%。今天探测到宇宙中氦的丰度为 25%～33%，与理论计算结果恰好一致，这是对大爆炸宇宙学的有力支持。

大爆炸后的温度变化见图 8.20。在大爆炸发生后约 100 万年，宇宙的温度下降到 3000K。这时原子开始形成，光子与物

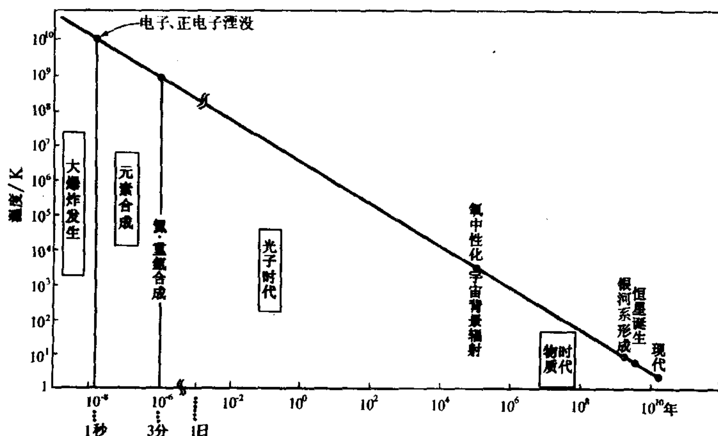


图 8.20　大爆炸后的温度变化图

质粒子的作用变得很弱，宇宙也变成了对电磁辐射是透明的。正是因为电磁辐射与实物的相互作用极度减弱，它的演化情况也将与物质分开来。此后宇宙在膨胀，温度在继续降低，但这一电磁辐射却保持其黑体辐射谱。计算表明，从那时到现在，这一残留的辐射，温度由3000K降到3K左右。1965年彭齐亚斯和威尔逊发现在7.35cm波长存在各向同性的微波辐射，其温度为4K左右，辐射的各向同性，表明它不可能来自某一天体。这一观测结果立刻使宇宙学家意识到，它有可能是大爆炸的遗迹而称之为"宇宙背景辐射"(图8.21)。人们在不同微波范围内测量出它的强度分布，证明这一分布和绝对黑体在温度为2.9K时发射的辐射的强度分布相同。观测结果和理论预言几乎完全一致，这是对大爆炸宇宙学又一非常有力的肯定。

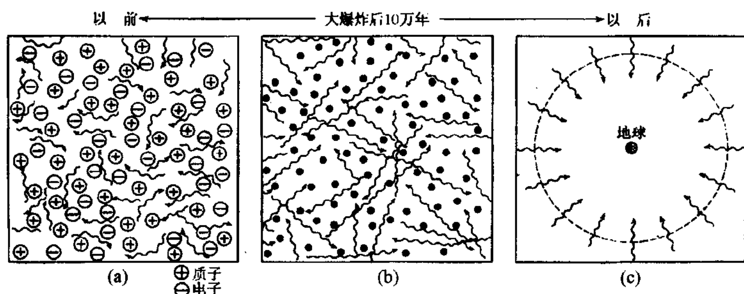


图8.21 氢的中性化和背景辐射的生成

大爆炸宇宙学最困难的问题是奇点问题，当我们继续上溯到爆炸时刻的宇宙，它理应为温度无限高、密度无限大的状态，而这正是当今物理学和数学所难以理解和无法处理的。

按照爱因斯坦方程的弗里德曼解，对于开放的宇宙，可能是永远不停地膨胀下去，也可能是经历膨胀后又收缩；若对于封闭的宇宙，爱因斯坦方程则又预言，膨胀最终将会停止，然后宇宙收缩，最后在一次"大坍缩"中结束，宇宙的未来究竟如何？我们只能期待将来的进一步的研究了。

8.3 量子论的产生和量子力学的发展

8.3.1 量子论的产生

量子论的产生是从物理学界的另一朵“乌云”所引出的，从日常的经验我们知道，一个物体(固体或液体)温度升高时，会向四周辐射热量，物体温度越高，热辐射越强烈，光谱中最强的辐射频率越高，该物体颜色就由“红”到“黄”到“蓝”。当这种辐射照到另外一个物体上去时，有的物体能吸收这些辐射的能量，有的物体则很少吸收，而将这些辐射反射出去。实验证明，吸收辐射本领大的物质同时也是发射本领大的物质。一种“理想”的黑体将能够100%地吸收投射到它上面的能量，而在同样温度下，它所发出的热辐射也比任何其他物体强。若在一个密闭空腔表面开一个小孔，空腔内壁非常粗糙，任何一种辐射都有进无出，100%被吸收，这个小孔就成了一个“黑体”了。19世纪末，有人对“黑体”辐射的单色辐出度 $u(\lambda)$ 作过研究，得出了 $u(\lambda)$-λ 的曲线(图8.22)，该曲线有如下特征：

(1) 对一定温度 T，曲线形状是确定的。

(2) $\int_0^\infty u(\lambda)\mathrm{d}\lambda = aT^4$，其中 $u(\lambda)$ 单色辐出度，a 为常量，且 $a=\frac{4\sigma}{c}$，其中 c 为光速，σ 为斯特藩-玻尔兹曼常量。

(3) 一定的温度为 T 的 $u(\lambda)$ 最高点所对应的波长为峰值波长 λ_m，则有 $\lambda_m T=$ 常量 $=0.2898\ \mathrm{cm\cdot K}$。

对此，维恩作了解释，他根据热力学，结合实验推出了一个公式

$$u(\nu)=B\nu^3\mathrm{e}^{-A\nu/T}$$

它在 λ 小的区域几乎与实验完全符合，只是长波区，稍低于实验点。

1900～1905年瑞利、金斯两人假定腔内电磁波形成驻波，

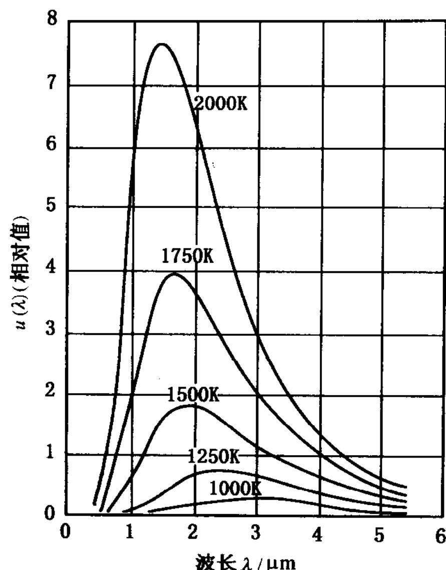


图 8.22 几种温度下的黑体辐射谱

他们利用经典统计物理来计算，推导出另一公式

$$u(\nu)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

它在低频(长波)方面与实验符合尚好，但在高频则相差很大。上式中 k 为比例常数。

瑞利-金斯公式推导思想明确，其立论、推导均无错误，都是根据经典物理学一步一步推得的，现在它与实验不符合，一定是经典物理的基本原理有问题了，由于问题出在短波段，所以也有称之为“紫外灾难”的。

有一位德国物理学家把注意力集中到这方面来了，他就是 M.普朗克。

德国物理学家普朗克(Max Planck, 1858—1947)生于德国的基尔城，他的父亲是法学教授。1874 年 10 月，他进入慕尼黑大学，最初决定主攻数学，但很快又被物理学所吸引。他的老师约利(P.Jolly)曾极力劝说他不要研究物理。约利告诉普朗克：

“在这一学术领域里，已经没有什么本质上新的东西有待发现了。”但是普朗克还是坚持抛弃纯数学，因为他对宇宙本质问题有浓厚的兴趣。他在《科学自传》中谈到了他从青年时期起就爱好科学的原因。他说：“引导我从事科学研究和从青年时期起就爱好它的原因，是一个不十分自明的事实，这就是我们的思维规律和我们从外界接受的自然过程的规律是符合一致的，因而使人们有可能通过纯粹思维对这种规律作出解释。对此具有重要意义的是，外部世界是我们所面对的、独立于我们而存在的绝对所在，而探索这种绝对存在所适用的规律，我认为就是最崇高的科学研究任务。”这些话表明了一个科学家朴素的唯物主义思想，他坚信外部世界是独立于我们而存在的客观存在，他坚信真理的客观性，他认为探索这种绝对存在所适用的规律是科学研究的崇高任务。



普朗克(1858—1947)

普朗克早期的物理思想受到克劳修斯的深刻影响。当他在慕尼黑大学学习物理和数学时，就以极大的热情自学了克劳修斯的名著《热力学》。他在《科学自传》中，在谈了课堂教学的不足之处后紧接着说：“在这种情况下，我只能通过自学我所感兴趣的书刊来满足我的求知欲望，这时我所学习的自然都和能量定律有关。我在偶然中得到了克劳修斯的一本著作，它的明白易懂的语言和深入浅出的叙述给我留下了非常深刻的印象，我钻研它们的兴趣越来越高。”克劳修斯的一些主要热力学观念，如不可逆性、熵增加原理等给他留下了极其深刻的印象。他把克劳修斯称为的“不可逆过程”命名为“自然过程”。他认为熵增加原理具有热力学第二定律的意义。他在1879年完成的博士论文中，对热力学第二定律作了详细的论述，但这篇论文并没有引起人们的兴趣。

但是,这种淡漠的态度并没有阻止普朗克对熵的研究。他在《科学自传》中说:"由于深刻体会到这个问题的重大意义,这些遭遇并没有阻止我继续对熵进行研究,因为我把熵看作和能量一样,也是物理过程最重要的特征。"1880 年 6 月,普朗克写了《不同温度条件下物体的平衡熵》一文,获得慕尼黑大学授予的特别奖状。所以,我们可以看到在普朗克的热力学思想中,熵增加原理和非平衡态向平衡态发展的不可逆性,始终占有最根本的地位。他把熵增加原理看成和能量原理一样是物理学中一条不可缺少的独立定律。这个在他青年时期形成的中心思想,一直主导着他的科学工作。当然也就决定性地影响了他处理黑体辐射问题的方式。

从 1894 年起,普朗克把注意力转向黑体辐射问题。他在 1990 年首先改进维恩公式,拟合实验数据,得到了如下的公式:

$$u(\nu)=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\cdot\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$$

式中引入了一个常数 h,以后就称为普朗克常数,它的数值:

$$h=6.625\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$$

这样一来,普朗克公式与实验就符合得非常好(图 8.23)。在高

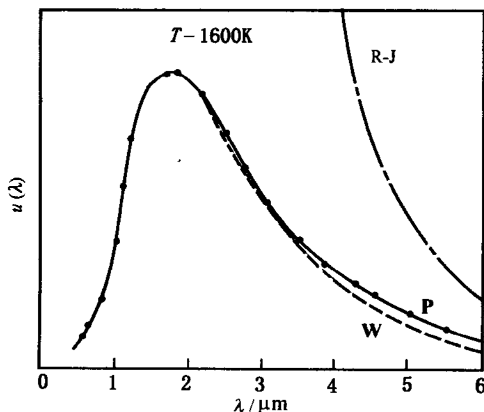


图 8.23　1600 K 的热辐射谱

频区 $h\nu \gg kT$ 分母中的 1 可以略去，普朗克公式就近似地化为维恩公式；而在低频区，$h\nu \ll kT$，$e^{h\nu/kT} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$，则它又近似地化为瑞利-金斯公式。令人高兴的是，过去维恩和瑞利-金斯两个公式分别只顾一头，现在普朗克公式则全面兼顾到了。

普朗克注意到在过去的理论中，器壁上的分子、原子被看作为吸收电磁波的“振子”，在能量上可以连续变化，就是说，电磁波和振子间的能量交换可以无限制地减小或增大，这一假定直接导致瑞利-金斯公式，而这是不正确的。普朗克坚信，解决黑体辐射问题的关键在于弄清楚这些振子吸放电磁辐射的规律，于是他决定放弃经典的能量均分原理，勇敢地假定振子的能量不可以连续变化，当它吸、放频率为 ν 的电磁波时，它只能处于一些等间隔的能量状态中的一个，其能量为

$$E_n = nh\nu \qquad (n = 0, 1, 2\cdots)$$

式中 n 叫量子数，它只能取正整数。把每一个可能的能量状态称为量子态，这种不连续的“量子”化的能量状态常以图 8.24 来表示，假定位置固定的（定域的）振子状态按能量的分布几率仍服从经典的玻尔兹曼统计分布公式，则可算出振子的平均能量

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

同时再假定空腔内频率为 ν 的电磁辐射与器壁上同频率的振子交换能量，从而达到平衡状态，于是立即可推得普朗克公式。如果 n 不限于正整数而可以连续变化，或者 $E = nh\nu$ 中的普朗克常数 h 趋向于 0，从而 E_n 的数值可以连续变化，即图 8.24 的能级无限密集的话，那么因 $h\nu \ll kT$，近似有

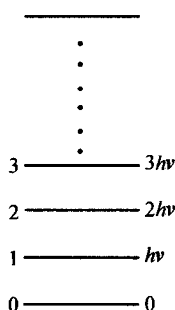


图 8.24 振子能量量子化

$$\bar{E} \approx \frac{h\nu}{\left(1 + \frac{h\nu}{kT} - 1\right)} = kT$$

这就回到了瑞利-金斯公式。由此可见，瑞利-金斯公式在短波(高频)区的失败，显然是由于没有考虑到振子能量量子化的原因。就这样，在1900年诞生了量子物理学，它宣告过去经典物理学那种无限连续的观念破产了，微观世界中原来存在着不连续性，普朗克常数 h 就是这种不连续性的表征，$h\nu$ 则是频率为 ν 的振子能量的最小单位。

在普朗克理论中，只考虑了空腔内壁上"振子"能量的量子化，但对空腔内电磁辐射的处理，还是用了麦克斯韦理论，就是说电磁场在本质上还是连续的，只是当它们与器壁振子发生能量交换时，电磁能量才显示不连续性。这种观点还是不彻底的。1905年爱因斯坦进一步假定，电磁场能量本身也是量子化的，即辐射能本身也是量子化的，对于频率为 ν 的场的能辐射单位止是 $h\nu$，这样一份一份的电磁辐射，在后来被叫做"光子"。

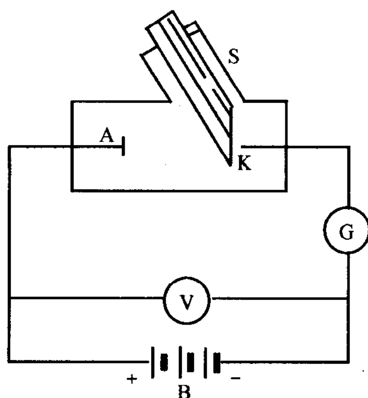


图8.25　真空中光电效应实验

爱因斯坦最初引入光子概念是用来解释光电效应的。1887年赫兹首先发现了光电效应，1902年勒纳详细研究了光电效应的规律，研究的装置如图8.25所示。图中S为一抽成真空的玻璃容器，其中装有阳极A和阴极K，阴极为一金属平板，为了使光线(紫外线)能够穿过S直射至K上，S的端面开一窗口(为了不使紫外线被吸收常用石英窗口)；然后将该系统串联于有灵敏电流计G的回路中，并接一伏特计以测定电压，当光线(紫外线)照射到K上后，K上释放出电子，由此研究光电效应的基本规律。

测量中发现以下几点，难以用光的波动理论来解释。

(1) 对给定的光电阴极材料，若用不同频率的光照射时，并非所有的光都能使阴极上释放出电子，存在一个频率的阈值 ν_0，称为“红限”。只有超过“红限”ν_0 的光，才能引起光电效应，它与光强大小无关，这与光的波动说是矛盾的，按光的波动说，只要光强足够大，理应任何频率的光都可产生光电效应，不应存在“红限”。

(2) 实验发现从光阴极 K 发出的光电子的最大初始动能与入射频率成线性关系，即

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = a\nu + b$$

它与入射光强无关。要按光的波动理论，光电子的最大初始动能应对应于某光波中的某一频率 ν_i，此时它能使光电子共振，若大于或小于 ν_i，光电子初始动能都会减少(图 8.26)。

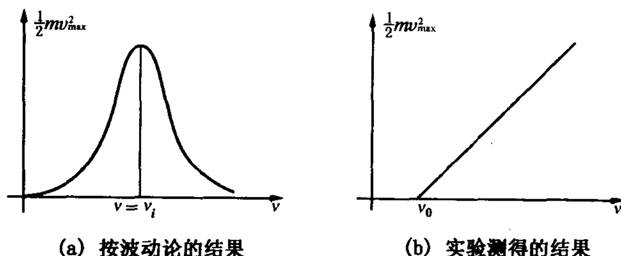


图 8.26　光电效应中光电子动能与光频率的关系

(3) 按光的波动理论，物质中原子从入射光中吸收能量，必然使能量积累到一定数值后(即让光照射一段时间后)才能解释放出电子，尤其在入射光弱时更应如此。但实验结果表明，只要入射光的频率大于“红限”，不论它有多弱，光电子总是立即发射出来的(10^{-9}秒左右即可发射出来，可以认为是瞬时发生的)，这又是波动理论不能解释的问题。

爱因斯坦在 1905 年，把 1900 年普朗克提出的能量子的概念加以推广，用来处理光与物质的相互作用的问题，他假设光在空间传播时，一束光是一群以光速 c 运动的粒子流，这些粒子称

为光量子，现称光子，每一个光子的能量 $E = h\nu$（h 为普朗克常数，ν 为光的频率），不同频率的光子其能量不同，当其照射到金属阴极 K 上时，光电子从照射光子的能量 $h\nu$ 中接受能量，其中一部分是消耗在足以使自己脱离金属表面所需的逸出功 A，剩余的能量则转化为电子的动能 $\frac{1}{2}mv^2$，因此有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

这就是有名的爱因斯坦光电效应方程。可用此方程来解释“红限”存在、光电效应时间极短以及光电子动能与频率的线性关系。

爱因斯坦光电效应方程不仅圆满解释了光电效应实验的问题，而且是人们第一次认识到光（电磁波）具有“波”“粒”二象特征，这是具有历史意义的。接着再来讨论康普顿效应，康普顿效应是用一束波长为 λ 的 X 射线，投射到一块石墨上，经散射后 X 射线中除了与原波长相同的 X 射线外，还存在波长大于原波长的射线，用光的波动理论不能解释康普顿效应，因为光波作用于石墨，使石墨中电子等带电粒子形成受迫振荡，则其波长不应变化。若认为是“X 光子”与原子中电子相互作用，则可解释散射的 X 射线中既有波长不变的，又有波长变长的射线出现。当 X 光子作用于自由的，或束缚微弱的电子，由于 X 光子把一部分能量给了电子，其能量下降因频率下降，而波长较原来为长；当 X 光子作用于束缚很紧的电子，甚至是和整个原子作用时，按碰撞理论，它不会失去能量因而波长不会变化，而且康普顿实验得出的规律又进一步证实了光子和物质作用中，起作用的不仅是它的能量，而且还有它的动量，这又进一步肯定了光的量子说理论。

8.3.2 原子光谱的规律

关于原子结构的认识，很重要的一个方面是从分析与研究原子光谱的实验资料、经验公式而开始的，但光谱学的研究和发

展却是早在原子理论建立之前就开始了，由于氢原子是所有原子中最简单的原子，氢原子光谱也是原子光谱中最简单的一个。

早在19世纪80年代，人们从某些星体的光谱中观察到的氢光谱线已达14条。1884年，瑞士的一名中学教师巴耳末(J. J.Balmer，1825—188)研究了瑞典物理学家埃斯特朗(A. J. Angström，1814—1874)从气全放电管中获得的氢原子的四条明亮的光谱线，这些谱线分别称为H_α、H_β、H_γ、H_δ，它们的波长为

H_α $\lambda = 6562.10\text{Å}$① (红色)

H_β $\lambda = 4860.74\text{Å}$ (绿色)

H_γ $\lambda = 4340.10\text{Å}$ (蓝色)

H_δ $\lambda = 4101.20\text{Å}$ (紫色)

巴耳末发现这四条光谱线的波长可以用一个简单的数学公式表示出来，即

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4} \qquad (n = 3,4,5,\cdots)$$

式中$B = 364.5\text{nm}$②。由该式计算所得的波长数值在实验误差范围内与测得的数值是一致的。后人称这个公式为巴耳末公式，而将它所表达的一组谱线称为巴耳末系(见图8.27)。它构成一个很有规律的系统，谱线的间隔和强度都向着短波方向递减。

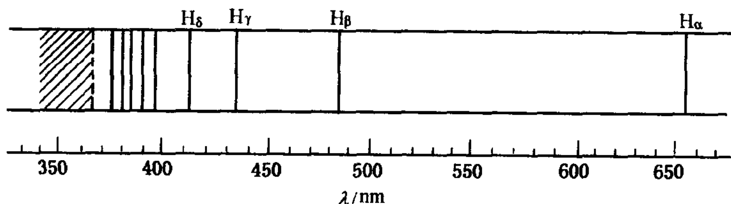


图8.27 氢原子光谱的巴耳末系和系限外边的连续谱

① $1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$。

② $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$。

后来人们又把上述公式改写为：

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{10^7\text{nm}^{-1}}{364.5}\cdot\frac{n^2-4}{n^2}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

式中 $R=1.097\times10^7\ \text{m}^{-1}$叫做里德伯常量，它是由瑞典物理学家里德伯(J. Rydberg, 1854—1919)将巴耳末公式改变后推得的。

8.3.3 玻尔的氢原子模型

尼耳斯·玻尔(Niels Bohr, 1885—1962)是丹麦杰出的物理学家。

1903 年秋季，玻尔进入哥本哈根大学的数学和自然科学系，主修物理学。1909 和 1911 年作硕士和博士论文的题目是金属电子论，在这过程中接触到量子论。1911 年秋季，玻尔赴英国剑桥大学学习和工作。1911 年 10 月间，卢瑟福到剑桥来参加卡文迪什实验室年度聚餐会，在会上发表了长篇演讲，论述了自己的新发现。玻尔后来回忆说，他对“卢瑟福性格上的魅力和魄力得到了深刻的印象”。他有转到曼彻斯特工作去的愿望。在他拜访卢瑟福时，卢瑟福向他介绍了他刚参加第一次索尔维物理会议的情况(这次会议的议题是辐射和量子理论)，也提到普朗克和爱因斯坦的看法以及自己对物理学发展前景的看法。这次谈话对玻尔以后的科学生涯产生了十分重要的影响，使他了解到量子论进一步发展的情况，种下了他不久将普朗克的能量子、爱因斯坦的光子概念和原子核式模型结合起来的种子。

1912 年 3 月到 7 月，玻尔在曼彻斯特大学卢瑟福的实验室工作。这在他的终身事业中是一个最有决定意义的转折。玻尔到来时，卢瑟福等人已经确证了原子核的存在，追求原子核所将引起的各方面的后果成为整个曼彻斯特科学集体的兴趣中心。

玻尔热心地接受了卢瑟福的原子核式模型(参见图 8.28)，而且很快就认识到它的深远含义。他指出元素的化学、物理性



J.J.汤姆孙(1856—1947)
英国物理学家



E.卢瑟福(1871—1937)
英国物理学家



N.玻尔(1885—1962)
丹麦物理学家

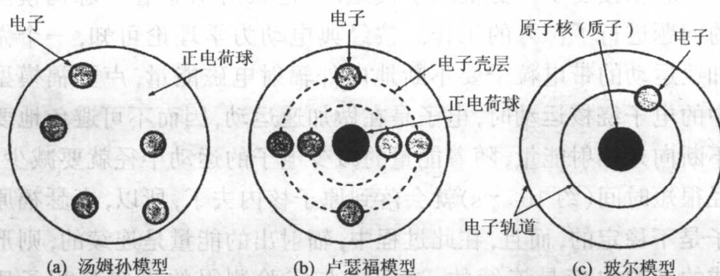


图 8.28 现代物体构造观(原子构造模型)的发展

质,由原子的核外电子所决定,原子所含的电子数目决定原子在周期表中的位置。也就是说,在决定原子的化学性质上,原子序数比原子量更根本。当玻尔听说周期表在原子量顺序方面显示了一二处反常,已经鉴定下来的稳定元素和衰变元素的数目超过了门捷列夫周期表中可以利用的位置时,他一下子就想到这些化学上无法分离的物质具有相同的核电荷,其不同只在核的质量和内在结构上。玻尔证明了如果人们承认电荷相同而质量不同的原子核的存在,从而有不止一个原子品种占据周期表的同一位置,则所有这些反常性都可以消除。后来把这种具有不同质量而在化学上不可区分的原子命名为"同位素"。

玻尔还指出元素的放射性质直接与原子核有关,由放射性

元素放出的α粒子及电子来自原子核。早在1902年卢瑟福就提出了放射性元素的嬗变理论。他指出放射性物质是不稳定的，它不断放射出某种射线进行衰变，即由母元素变为子元素直至变成稳定元素为止。玻尔按照原子核式模型，认为放射性衰变必须被设想为原子核的实际嬗变。于是玻尔就论证说，通过α射线的发射，原子核就失去两个单位电荷而变成周期表上退后两位处的那一元素的同位素。另一方面，在β衰变中，一个负电子的发射导致一个单位电荷的获得，从而嬗变后的元素就占据了周期表上向前一位的位置。尽管看起来很简单，导致这些放射元素的"位移定律"的那种猜想在当时却不是显而易见的。

玻尔接受了卢瑟福原子模型，但他又对困惑着卢瑟福模型的问题进行了深入的工作。按经典电动力学理论可知，一个做加速运动的带电粒子要不断地向外辐射电磁能量，卢瑟福模型中的电子绕核运动时，电子是在做加速运动，因而不可避免地要不断向外辐射能量，随着能量的减少电子的运动半径就要减少，经很短时间(约 10^{-12}s)就会落到原子核内去了，所以，卢瑟福原子是不稳定的，而且，在此过程中，辐射出的能量是连续的，则形成的光谱也应是连续的，这两点与实验测得的事实是相矛盾的。

为此，玻尔以原子稳定性与原子光谱实验规律为基础提出的三点基本假设：

(1) 氢原子中的一个电子绕原子核作圆轨道运动；

(2) 同经典理论相反，电子只能在处于一些分立的轨道上，它在这些轨道上运动不会辐射电磁波，每一允许的轨道对应于一个确定的能量值 E_n，即在氢原子中存在着一些具有确定能量的稳定态；

(3) 当电子从一个允许轨道跳跃到另一允许轨道时，便会发射(或吸收)一份电磁辐射，即发射(或吸收)光子，光子的能量 $h\nu$，由两轨道的能量差 $E_n - E_{n'}$ 决定：

$$h\nu = E_n - E_{n'}$$

$$E_n - E_{n'} > 0 \quad 发射光子$$

$$E_n - E_{n'} < 0 \quad 吸收光子$$

根据玻尔理论，氢原子光谱的产生可解释如下：由 $E_n = \frac{Rch}{n^2}$ 可知，n 愈大，原子系统能量的绝对值愈小，但代数值愈大，亦即电子离核愈远，原子能量愈大。电子在第一轨道亦即最内层轨道（$n=1$）时，能量最小，原子最为稳定。这种状态称为基态。量子数 n 大于 1 的各个稳定状态，其能量均大于基态，称为受激状态。当原子由正常状态跃迁到受激状态时，原子必须吸收一定的能量。处于受激状态的原子能够自发跃迁到能量较低的受激状态或基态，在跃迁过程中，将发射一个一定频率的光子，其频率大小由 $\nu = \frac{1}{h}(E_2 - E_1)$ 决定。

根据改写后的巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ 和 $\lambda = c/\nu$ 可得

$$h\nu = Rhc\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

若令

$$-Rhc\frac{1}{n^2} = E_n$$

则

$$h\nu = E_n - E_2$$

此式暗示人们，可以猜想氢原子中的电子可以处于一些分立的能级上，每一能级用一个“量子数 n”联系着，n 取正整数，当氢原子中电子在分立的能级上跃迁时则会发出一定频率的光子而形成光谱。这个猜想的本质是个难题，阐明了它就把物质结构阐述清楚了。氢原子光谱也得到了合理的解释。图 8.29 是氢原子的电子轨道示意图。图中画出的那些轨道是允许的轨道。当氢原子中的电子从不同的较外层的稳定轨道，

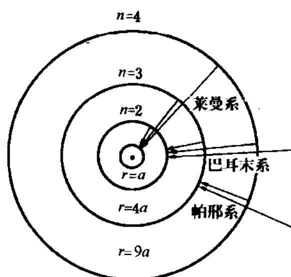


图 8.29　氢原子的电子轨道及光谱线

跃迁到较内层轨道时,便发射出相应的谱线系。应当注意,在某一瞬时,一个氢原子只能发射出一条谱线,不同受激状态的氢原子才能发射不同的谱线。在实验中实际观察到的是处于各种轨道上的大量受激原子所发射的光,所以我们能够同时观察到全部谱线。

氢原子谱线的产生也可用能级图来表示。与轨道对应的能量只能有分立的数值,常称为能级。图 8.30 是按能量大小的比例画出的能级图。并标出了基态、激发态等的位置。

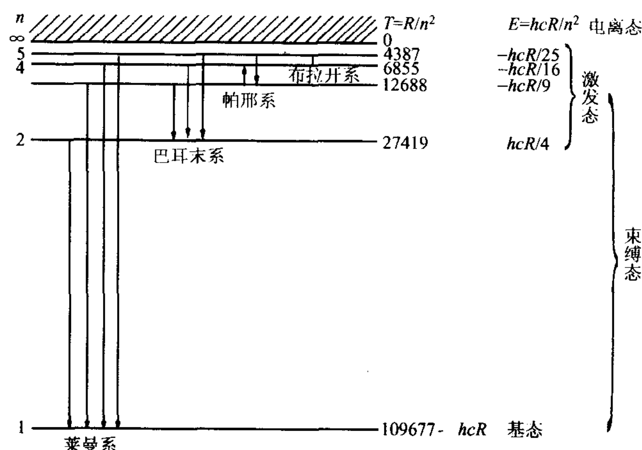


图 8.30 氢原子能级

玻尔假设电子在原子核的库仑场中绕核做圆周运动时,绕核运动的角动量是一个常数,他是由此而确定圆周转道半径的,经过后来其他科学家努力,形成了一套比较完整的原子结构的量子图像。即:电子绕核运动共有四个自由度,其中三个自由度确定了电子绕核的三维空间轨道运动,第四个自由度决定了电子自身的运动,我们用表 8.1 作详细说明。表中$\hbar=\dfrac{h}{2\pi}$。

由于这些表征电子运动力学量的量子化,经典理论中的连续变化受到了上述量子条件的限制,使电子从无限多种状态中只能选取其中的某些状态——量子状态,每一个量子状态都由

四个量子数,n, l, m, m_s 来表示。

表 8.1

表征量子状态的力学量	表示式	量子数及其取值	对原子结构图像的影响
能量	$E = E_n$	主量子数 n $n = 1, 2, 3, \cdots$	n 决定电子绕核运动半径大小
角动量	$L^2 = 1(l+1)\hbar^2$	轨道量子数 l $l = 0, 1, 2, \cdots, n-1$	l 决定电子绕核运动轨道的形状(如,圆轨道,椭圆轨道,更扁的椭圆轨道等)
角动量 z 方向分量	$L_z = m\ \hbar$	方向量子数 m $m = 0, \pm 1, \cdots, \pm l$	m 决定电子绕核运动轨道平面的取向,m 称为磁量子数
自旋角动量	$s_z = m_s\ \hbar$	自旋量子数 m_s $m_s = \pm \frac{1}{2}$	m_s 决定电子自旋方向是向上或向下

8.3.4 量子力学的发展

以玻尔理论为基础的量子理论,尽管取得了不少令人惊奇的结果,但也存在着严重的缺陷和不足,由于这一理论是经典理论加上量子条件的混合物,因而不可避免地存在着难以解决的内在矛盾。它首先一方面把微观粒子看作经典力学中的质点,采用坐标、轨道等概念,并应用牛顿定律来计算电子轨道,而另一方面又以量子条件限定了微观粒子稳定运动状态的轨道。在定态的绕核运动中的电子不发射电磁波,而在定态之间的跃迁又是一个不连续的过程,这些量子化特征与经典力学结论相悖。应用玻尔理论于氦原子的原子结构就已经在数学上困难不少,更谈不上其他复杂的原子了,因此,物理学发展面对的现实,要求有一个新的物理思想体系的诞生。

1923 年,德布罗意提出“物质具有波粒二象性”的假设,创造性地做出“电子具有波动性”的预言,为量子论的发展开辟了一条崭新的途径,打通了薛定谔通往波动力学的道路。1926 年,玻恩提出波函数的统计解释,找到了波与粒子统一的线索,把波与粒子统一到几率波概念的基础上,为量子力学提供了全

新的概念基础。1927 年，海森伯提出了不确定性关系（或原理），加深了人们对量子本质的认识，极大地推进了人类认识微观客体本质属性的历史进程。



D.L.V.德布罗意
(1892—1987)

路易·德布罗意（Louis de Broglie, 1892—1987），1892 年 8 月 15 日生于法国塞纳河畔迪埃普(Dieppe)，出身于贵族。中学毕业后，他进入巴黎大学学习，最初学习历史、法律，1910 年获学士学位。在学习期间受到他的哥哥莫里斯·德布罗意研究 X 射线和庞加莱著作的影响，对科学感兴趣，1911 年改学物理学，1913 年获得“科学证书”。第一次世界大战期间，他在埃菲尔铁塔上的军用无线电报站服役六年(1913—1919)。战后，他重新钻研物理并在他哥哥的实验室参加实验研究工作。1922～1924 年间逐渐形成他的物质波思想。1924 年获巴黎大学科学博士学位。1928 年任巴黎大学理论物理教授。1929 年获得了诺贝尔物理学奖。1933 年被选为法国科学院院士。

我们在前面已讨论了普朗克提出的经典量子论，爱因斯坦提出的光量子概念，以及康普顿的 X 光子的散射效应等为解决微观世界的疑难问题做出了很大贡献，玻尔的原子结构模型又进一步完善量子理论，这些研究表明 20 世纪的物理学研究在光学上纠正了过去只注重波动的研究方法而忽略粒子的研究方法的错误，同样，在对实物粒子的讨论中是否又会有相反错误呢？是否过多地讨论粒子性而忽略波动性呢？在爱因斯坦的光量子理论中，对光子的描述使用了两种矛盾的学说，那么对电子以及其他物质粒子，它们是否也有波动性呢？正是基于这种思考，德布罗意注意研究光的波动和实验粒子之间运动的相似性，他还

独特地发现原子中表征量子状态的量子数只取整数，与波动光学中干涉、衍射现象的取整数之间似乎也有某些微妙的相似之处，因此，德布罗意大胆的设想电子和其他物质粒子就像光子和光波一样具有波动和粒子二象性，1924年德布罗意提出了一个大胆的假设：

电子和其他物质粒子就像光子一样，具有波动和粒子两重性，因此，电子也像光子一样可以引入频率，波长等概念并和光子一样有如下关系：

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

和

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v}\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

电子的这种关系式，称为德布罗意关系式。这种和实物粒子相联系的波称为德布罗意波或物质波。

德布罗意的论点是在他的博士论文中阐明的，他的导师是朗之万，在由佩兰(Perrin)、朗之万、卡坦(Cartan)和莫格因(Maugain)组成的论文答辩委员会中各位委员对德布罗意的工作印象极佳。朗之万审阅了德布罗意的论文，他在报告中强调“除了思想的独创性外，德布罗意以非凡的技巧作出努力来克服阻碍物理学家的困难”。他赞赏德布罗意理论的连贯性、真实性。但是，由于当时物质波理论还没有任何实验证据的支持，所以多数答辩委员对物质波的真实性存在疑虑。当答辩委员会主席佩兰问道：“这些波怎样用实验来证明？”德布罗意回答说：“用晶体对电子的衍射实验是可以做到的。”这是他早已考虑过的方案，并曾向他哥哥的同事道维耶(Dauvilier)提出做这个实验，但是后者因忙于其他实验而将之搁置下来。

德布罗意的物质波理论，最初并未受到物理学界的重视，但

在他的导师朗之万将论文的复印本寄给了爱因斯坦后，事情起了戏剧性的变化。爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称性，所以对德布罗意的想法很感兴趣，非常赞同，竭力支持。1924 年 12 月，爱因斯坦在给朗之万的复信中对德布罗意的工作给予很高的评价，声称这是“揭开了大幕的一角”。同年 12 月 26 日，爱因斯坦写信给洛伦兹，非常详细地谈到德布罗意的工作：“我们熟知的 M. 德布罗意的弟弟已经对于解释玻尔和索末菲的量子规则作了非常有趣的解释。我相信这对于揭示我们物理学中最难以捉摸的谜，开始露出了一线微弱的光芒。我还发现了支持他的解释的一些东西。”次年 1 月，爱因斯坦在柏林科学院的会议周报上发表的一篇论文中写道：“我将很仔细探讨这个解释，因为我相信它包含了比类推更多的东西。”他在同年 2 月发表的爱因斯坦-玻色统计的论文中，指出在德布罗意“非常值得注意的文章中”，把一个粒子归结为一个波场。他写道：“看来粒子的每一运动都伴随着一个波场，这个场应该是能观察到的”。爱因斯坦认识到德布罗意工作的重大意义，他对玻恩说：“您一定要读它，虽然看起来有点荒唐，但很可能是有道理的”。玻恩在 1925 年 7 月 15 日给爱因斯坦的信中写道：“随后，我读了 L. 德布罗意的论文，并逐渐明白他们搞的是什么名堂，我现在相信物质波理论可能是非常重要的。”

德布罗意的论文经爱因斯坦推荐后，引起物理学界的广泛重视，特别是对奥地利物理学家薛定谔产生了深刻的影响。薛定谔也是在朗之万的促使下阅读了德布罗意的论文，他在发表波动力学的一系列论文以前，写了一篇关于气体理论的文章，清楚地说明了他对德布罗意假设的看法。他在绪言中说：“这意味着除了认真地考虑德布罗意-爱因斯坦的运动粒子波动理论之外，再无别的途径可言。”在 1926 年初，薛定谔发表他的第一篇波动力学论文时，曾清楚地表示他的“这些考虑的灵感主要得自德布罗意先生独创性的论文”。这就说明波动力学是在德布罗意物质波思想的直接影响下所获得的一个丰硕成果。

最早从实验上证实电子衍射现象是美国的戴维孙(Davisson)和他的合作者革末(Germer)。1926 年他们将电子枪射出的电子束投射到镍单晶体表面上,研究了散射电流与轰击电压和散射角的关系,肯定了这是电子衍射的结果。经过定量计算,证明了德布罗意波长公式的正确性。1927 年 4 月,他们把实验研究结果公布在《自然》杂志上。

图 8.31 是戴维孙和革末的实验装置示意图。从加热灯丝 K 出来的电子经电势差 U 加速后,通过一组栏缝 D 成为很细的平行电子射线,以一定的角度投射到镍单晶体 M 上,经晶面反射后用集电器 B 收集。进入集电器的电子流 I,可用与 B 相连的电流计 G 来量度。实验时,使图中所示的两 Φ 角相等,并保持不变;改变电势差 U,量度相应的电子流强度 I。实验结果如图 8.32 中 I-U 曲线所示,在电势差 U 单调地增大时,电子流强度 I 不是单调地增大,而是明显地表现出有规律的选择性,只有当电势差为某些特点值时,电子流才有极大值。

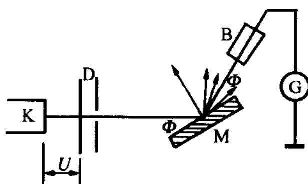


图 8.31 电子在晶体上的反射实验示意图

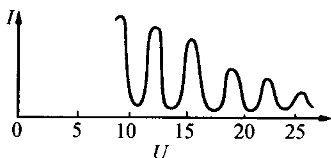


图 8.32 电子在晶体上的反射电流与加速电位差的关系

这个结果和 X 射线在晶体上反射时,产生规律类似,这说明电子和 X 射线一样也具有波动性,同样根据衍射图形测出的数据计算,电子波的波长,完全遵照德布罗意公式。

电子既然具有波动性质,那么很自然会使人联想起原子、分子和中子也理应具有波动性质,后来的中子衍射实验更证实了这一点。现在德布罗意关系式也成为人们的公认的表征电子、中子、质子、原子和分子等物质粒子的联系它们各自波动性和粒子性之间的基本公式了。

在经典力学中，纯粹的粒子是作为质点来对待的，都可以由机械决定论用一定方程式来描述，任意给定时刻，质点的位置、动量都会确定，而且随着时间的变化可以描述出它的确定的轨道。因此，在给定的作用力场中，知道初始时刻的位置、动量，就可确定今后任意时刻的位置、动量，也就是知道其状态了，但是，由于微观粒子具有波粒二象性，因而微观粒子就具有新的特征，即：对于微观粒子我们不能同时测出其确定的位置和动量，对此，人们称之为不确定关系。

下面以电子单缝衍射实验来说明，如图 8.33 所示，设有一束电子，以速度 v 沿 Oy 轴射向 AB 屏上的狭缝，狭缝宽度为 d，由于电子的波动性，在 CD 屏上将观测到衍射图像，如果只考虑第一级最小，根据波动的衍射理论，中心处与第一暗纹间应满足下列关系：

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d} \tag{8.5}$$

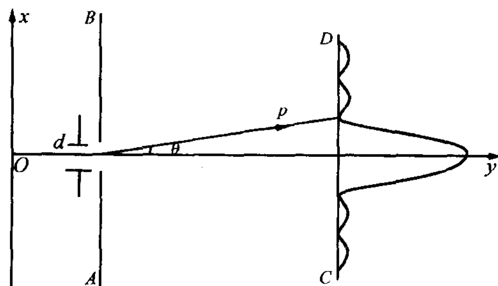


图 8.33　从电子单缝衍射说明不确定关系

上式中 λ 中电子波波长，根据德布罗意公式

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{8.6}$$

让我们考虑一个电子通过狭缝时的位置和动量。对一个电子来说，我们不能确定地说它是从缝中哪一点通过的，而只能说它是从宽为 d 的缝中通过的，因此它在 x 方向位置的不确定量就是 d，即有

$$\Delta x \approx d \tag{8.7}$$

由于电子动量的大小在通过狭缝前后保持不变，所以出射电子动量的 x 方向分量 p_x 只决定于它的出射角 θ。采取主峰近似，即忽略主极大以外的其他衍射峰，认为电子都落在中央主峰内，因此一个电子在通过缝时 x 方向的动量分量 p_x 的大小限制在 $0\sim p\sin\theta$ 的范围内，这表明，一个电子通过缝时在 x 方向上动量不确定量为：

$$\Delta p_x = p\sin\theta$$

考虑到衍射条纹的次极大，可得

$$\Delta p_x \geqslant p\sin\theta \tag{8.8}$$

联立(8.5)—(8.8)各式后，便得到不确定关系

$$\Delta x \Delta p_x \geqslant h$$

它说明在电子衍射的情况下，狭缝宽度 d 愈小，即位置不确定量 Δx 越小时，则同方向上衍射电子的动量不确定度就越大。这就是说，电子的位置限制得越准确，则动量值越不能准确地确定。

在这里，应当指出以上论证不足之处是：从方法论的角度看来，举例并不是证明。举出一个反例，就足以使任何理论发生危机。单靠举出一个又一个实例，是不足以证实一条原理或定律的普遍有效性的，这种方法叫做“简单枚举法”。即使举出了成百上千个符合不确定关系的实例，也无法保证第 101 或第 1001 个例子不出毛病。另一方面，我们看到在玻尔和海森伯都十分满意的这种“波粒二象性”的论证里，更多的是从经典光学那里搬过来的公式和定律，显然，这种论证是很粗略的，至于严格的推导是由海森伯给出的，这里就不再讨论了。

由上面讨论可见，对于处于微观力学系统的电子运动状态，不能用经典力学的方法去讨论，那么如何描述微观粒子的运动状态呢？它是由薛定谔提出的薛定谔方程来描述的。

薛定谔(Erwin Schrodinger, 1887—1961)，1887 年 8 月 12 日出生于奥地利首都维也纳。1906 年至 1910 年，他就学于维也纳大学物理系。1910 年获得博士学位。毕业后，在维也纳大学第二物理研究所从事实验物理的工作。第一次世界大战期


E. 薛定谔(1887—1961)

间,他应征服役于一个偏僻的炮兵要塞,利用闲暇时间研究理论物理。战后他仍回到第二物理研究所。1920 年他到耶拿大学协助维恩工作。1921 年薛定谔受聘到瑞士的苏黎世大学任数学物理教授,在那里工作了六年,薛定谔方程就是在这一期间提出的。

1927 年薛定谔接替普朗克到柏林大学担任理论物理教授。1933 年希特勒上台后,薛定谔对于纳粹政权迫害爱因斯坦等杰出科学家的法西斯行为深为愤慨,移居牛津,在马克达伦学院任访问教授。同年他与狄拉克共同获得诺贝尔物理学奖。

1936 年他回到奥地利任格拉茨大学理论物理教授。不到两年,奥地利被纳粹并吞后,他又陷入了逆境。1939 年 10 月流亡到爱尔兰首府都柏林,就任都柏林高级研究所所长,从事理论物理研究。在此期间还进行了科学哲学、生物物理研究,颇有建树,出版了《生命是什么》一书,试图用量子物理阐明遗传结构的稳定性。1956 年薛定谔回到了奥地利,被聘为维也纳大学理论物理教授,奥地利政府给予他极大的荣誉,设定了以薛定谔命名的国家奖金,由奥地利科学院授给。

利用德布罗意关系,我们可用一个单色平面波来描述一个有确定能量 E,确定动量 p 的自由粒子的状态,其形式为 $\varphi = \varphi_0\cos2\pi\left(\nu t - \frac{x}{\lambda}\right)$。若改成复数形式又可写成 $\varphi = \varphi_0 e^{-2\pi i\left(\nu t - \frac{x}{\lambda}\right)} = \varphi_0 e^{-\frac{i2\pi}{h}(Et - px)}$,$\varphi$ 是 x, t 的函数,得

$$\varphi(x, t) = \varphi_0 e^{-i\frac{2\pi}{h}(Et - px)}$$

此式亦称为德布罗意波函数。波函数振幅的平方表示在单位体

积中发现一个粒子的几率,称为几率密度。另外,由于粒子必定要在空间中的某一点出现,所以粒子在空间各点出现的几率总和等于 1,也就是 $|\varphi|^2$ 或 $\varphi\varphi^*$ 对全部空间的积分应等于 1,

$$\iiint |\varphi|^2 \mathrm{d}V = 1$$

上式称为归一化条件。此式的积分应遍及整个空间。又因为波函数是复数,有 $|\varphi|^2 = \varphi\varphi^*$($\varphi^*$ 为 φ 的共轭复数),和经典力学中描述粒子的运动方程相类似,微观粒子可用薛定谔方程来描述它,即:

$$\mathrm{i}\hbar \frac{\partial \varphi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\varphi(x,t) + U(x,t)\varphi(x,t)$$

从薛定谔方程我们可看出,牛顿定律是宏观物体的运动方程,只要准确给出了初始状态及力场分布,任何一个时刻的状态就惟一地确定了。微观粒子的运动规律,由于波粒二象性,位置、动量不能同时确定,无因果关系可言,海森伯曾经说过一句很精辟的话:"……在'如果我们确切地知道现在,我们就能预言未来'这句话里,结论倒没错而是前提错了。从原则上说我们是不可能详尽无遗地知道现在的。"

再者,从 $\varphi = \varphi_0 \cos 2\pi\left(\nu t - \frac{x}{\lambda}\right)$ 变为复数形式的 $\varphi = \varphi_0 e^{-i2\pi\left(\nu t - \frac{x}{\lambda}\right)}$,这并不能仅仅看成是数学上的运算而已,它是从一个平面波表示式抽象化为波函数的前奏,这并非是故弄玄虚,而是向揭露物理本质走近了一大步,列宁曾说过:"一切科学的(正确的、郑重的、不是荒唐的)抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映自然。"①

对于量子运动几率的问题,有几派争论意见,如哥本哈根学派的观点,也有隐函数的解释的观点,也有随机特性的观点等,目前尚未取得一致意见,但是,这是件大好事,因为科学发展的历史证明,不同观点,不同学派的争论必将是推动科学发展的重要因素。

---

① 列宁,《哲学笔记》,人民出版社 1974 年版,第 181 页。

第九讲　新世纪对材料科学提出的挑战和期望

9.1　材料科学是科学创新的基础

材料是人类制造机器、构件和物品的物质,是人类赖以生存和发展的物质基础。纵观人类利用材料的历史可以清楚地看到,每一种重要新材料的发现和应用,都将人类支配自然的能力提高到一个新水平,材料科学技术的每一次重大突破都会引起生产技术的重大变革,加速社会发展的进程,给人类的生产和生活带来巨大变化。例如,18 世纪纺织机、蒸汽机的发明和应用是以钢铁技术的发明和使用为基础的;20 世纪 50 年代以来,微电子技术的发展和应用是以单晶硅和其他半导体材料的使用、质量改进及相关加工技术的进步为基础的;20 世纪 90 年代以来,光电子信息技术的迅速发展则是以光导纤维等新材料的使用为基础的。

现在全世界都认为高新技术有三大块,一是信息技术,二是高新材料,三是生物技术。科学发展史表明往往一些科学上的很小的创新,就可以对技术的发展有非常大的影响,尤其是材料科学方面则更为显著。

人类开始使用材料的时代,是直接利用岩石、木材的时代,那时不需要作任何加工。后来就逐步过渡到利用火将泥土和沙子之类的东西加工成陶器、玻璃,进而又利用冶炼技术从矿石中炼出了铜、铁,这就进化到了通过加工而获得材料的时代,进而,又分为对无机材料、有机材料、金属材料几大类材料加工的时代。再进一步发展,又造出了在自然界本来没有的物质,如水泥、酚醛树脂、铝等很多种材料。开始时,这些材料主要是用作

日常的工具、武器，以及用于建立一个舒适的生存环境。这些材料，首先是要求要有好的强度。要求材料既具有强度又具有韧性，这是结构材料(structure materials)所重视的，而且它特别需要从其他功能中分出来单独考虑。除了结构材料外，还需要进一步考虑的是功能性材料，所谓功能是多种多样的，譬如像磁性之类的物理性能，像防腐蚀性之类的化学性能等，具有这样的不同特性的材料，都统称为功能材料。进入 21 世纪后，各种具有特殊功能的材料又不断被开发出来，当人们对高温超导材料，永久磁性材料等新材料还记忆犹新时，各种各样高度功能化的材料又层出不穷地被一一开发出来。当然，人类的需要是无止境的，不仅需要得到高度功能化的材料，而且，希望一种材料具有多种功能，这也就是材料—物质的复合化(integration)，这样一来，就把原来的材料分类的界限打破了，成为材料间可以自由组合了，现在又有人把能人工做成“生物结构”的仿生材料当作自己的目标，这样就需要不仅在结构上，而且在功能上都具有优良特性的材料。

另外，在材料制造、加工、利用、消费、废弃物处理等方面必须在保护整个地球的生态环境需要的前提下来考虑“材料”问题。

9.2 材料工程中几种常用材料的介绍

最早在材料工程的分类中，把常见的材料分为三大类，即金属材料、无机材料和有机材料。其实，金属材料也应隶属无机材料之列，但为强调金属材料，这里仍沿用前人的分类方法来进行单列。其中无机材料和有机材料是对由两种以上元素经过化学作用生成的化合物而言的。而金属材料则基本上是金属元素所构成的，当然，这里特别强调“基本上”三字，就是说为了改善很多金属材料的性能需要添加一些元素使之变为合金。例如，钢就是铁元素和碳元素的合金。18K 金就是 18/24 的金添加其他

元素而形成的合金。

9.2.1 金属材料(metallic materials)

从目前材料科学的发展来看,对金属材料有以下一些需求。

高纯度金属(extremely purified metals) 有些情况下,不需要合金,而是需要非常高的纯度的经过精制而成的超高纯金属。一般纯度的表示方法是以百分比来表示的。例如,硅的纯度为99.99999999%(俗称为10个9的纯度)。电子元器件的制造中为了能达到小型化和精密化常采用溅射的方法(例如:在真空中在某物质表面上做上一层极薄的电极材料),这时作为溅射的靶就需要纯度很高的材料。如需要高纯度的铜、钼、钽、钛等材料,这时的纯度至少要6个9以上,所谓的高纯度金属,它与我们通常所讲的纯金属在性质上有着很大的不同,因而其物性的数值也就有必要重新来改写了。例如,电阻值很小,耐腐蚀性特好等,这都是常见的普通的性能,而随着高纯度材料的发展,对材料中极微量元素含量的分析也就跟上了,提出了要开发相应高要求的分析技术,比如电阻值测定以后就可推算出其纯度了。

稀土金属(rare earth metals) 在使用纯金属中有少量的是稀土类元素。原子序号为57的镧,到原子序号为71的镥的13种元素,再加上钪和钇总计17种都被称为稀土元素。这17种金属元素的电子分布非常类似,因而其性质上也相互类似,要使它们单独分离出来是困难的,而且它们都具有其他金属所共有的性质。稀土金属的用途也很广,如强的永磁体,荧光物体,固体电解质,贮氧合金,陶瓷超导体等的化合物常常使用它们。另外,作为合金中的添加元素用得也很普遍。

我国的稀土资源非常丰富,在内蒙古自治区等地域蕴藏着大量的稀土资源。

使用金属材料时,有一个重要的概念叫做金属疲劳,这就是反复变化所加的荷重会造成即使在小的负荷应力的状态也会造成材料的断裂破坏。改变所加应力的大小进行反复数千万次的

变化，最终使材料破坏的现象，称为疲劳破坏。对于像金属材料那样韧性很好的材料，产生疲劳问题也较大。因此，这已不仅是一个学术名词了。一般来说，金属疲劳对飞机事故的产生和原子能反应炉状态的异常都有很大关系。在研究中与这方面相关的报道也不少，施加应力到一定程度后就会出现一些微小的龟裂，裂纹不断扩大，当达到一定长度后，就会一下子断裂了。若用电子显微镜来观察其断面时，会发现有波状起伏，这是在反复施加应力时，龟裂进展所残留的痕迹。

另一个重要概念是非晶态金属。普通金属都是金属原子按一定规则排列后形成的结晶构造，若高温下熔化时，则成了非晶的液体了。若将其在非晶的状态下使之迅速固化，则这就成了非晶态金属（非结晶金属）。

在制造上常用的方法是以 10 万～100 万℃/s 的降温速率使熔融金属迅速冷却而制成。具体做法有几种，如在高速旋转滚筒中放入液态金属，该液态金属通过滚筒喷出而成；又有将熔融金属喷入水中形成丝状物；在玻璃管中放入熔融金属，将二者一起拉伸再强冷；此外还有机械合金法等。非晶态金属的特点是抗拉强度、耐磨耗性、耐腐蚀性、磁特性等都非常优良。制造非晶材料时，不用纯金属而添加一些其他元素时，更容易形成非晶态。在超急速冷却时，原子必须急速地排列成整齐的状态。若是混入半径不同的原子时，它就给整齐排列造成障碍，因而就容易形成非晶态了。

机械合金法(mechanical alloying) 若把两种或两种以上的纯金属粉末，用球磨机，搅拌机等长时间混合、粉碎、混炼时，则在纯金属粉间因有原子水平级上的混合而形成强制固溶体，形成一种自然界尚未出现过的结构型化合物——非晶态合金，这种方法称为机械合金法。所得粉末经烧结可以制成所需要的形状。因为最终能获得的组织很微细，可以用以制造超微粒超塑性合金，以及韧性优良的金属间化合物，在塑性加工的粉体中即使在低温下也容易扩散，这对强度是有好处的。因而也可以说

使材料混合是最大限度地利用它的生产方法。

9.2.2 无机材料(inorganic materials)

和金属、有机材料来相比较，无机材料包含了更广范围，例如：肥料，酸、碱，颜料，复印的墨粉，直到像玻璃、陶瓷、水泥等都是。可是，现在很多情况下都误认为无机材料就是陶瓷了。陶瓷一词的英文名词源自希腊语，其原意"高温煅烧"的意思，而玻璃则是高温熔融而制成的，所以它有别于陶瓷。作为高新技术的新型陶瓷，日本称之为精细陶瓷(fine ceramics)，欧美等国则常称为先进陶瓷(advanced ceramics)，这是把陶瓷原料粉末(粒径在几十 μm 以下，一般是 μm 以下的较多)和黏稠剂混炼后，经过成型，放入炉中在 1000～1800℃ 的高温下，经过几小时或几天烧结，变硬变实而成的。一台电视机中有 250 只以上的电子陶瓷产品；汽车上有 50 多种的电子陶瓷产品；显像管、汽车的窗户是用高新技术制成的玻璃。

陶瓷是把地球上大部分元素都作为原料而生产的，其结构也是多种多样的，这样组合起来，进而就会得到的烧成物的微结构也是多样的了。若这样来考虑时，就可能制出无限多种类的各式各样的材料了。因此，许多国家都在研究、生产它。日本是一个陶瓷产品发达和先进的国家，其电子陶瓷的生产占到世界产量的 50%以上。近年来，我国电子陶瓷发展也很迅速。

当然，陶瓷的制造需要高温，它是高能耗工业。陶瓷类物品属易脆、易损物品，这是今后亟须解决的。但是，低温技术生产的开发；薄膜化生产的研究；改进含有铅等有害元素的陶瓷的生产，使之不含有有害元素；此外还有用垃圾作燃料生产生态水泥等，这些实用化的研究都在进行中。

预警破坏陶瓷

建筑物等最初膨胀而变形后尺寸就会变化，其后产生龟裂直到最后而破坏。例如在混凝土中加入碳素纤维，由于二者的伸长不同，可以及早发现其破坏而作预测的方法也有人提出来

了。但是对于精细陶瓷而言,其中多数是突然断裂的。为此,用氮化铝膜使之在陶瓷表面的同一方向上按相同结晶方向排列,当陶瓷上有力作用时,氮化铝则要产生电压,由此,可以预测陶瓷的破坏。这类研究现在尚未实用化,作为一种考虑的方法它是很重要的。

新型玻璃(new glass)

历来的玻璃都具有特定的高性能特征,而人工合成的原料和特殊的生产方法则能开发新材料,光缆就是一个实例。智能建筑中由于内部和外部的电磁信号的干扰常会出现误动作,为屏蔽电磁波则使用电磁屏蔽(electromagnetic shielding)玻璃。还有,为了把红外线反射掉使其绝热性能提高则使用热反射(heat reflecting)玻璃。眼镜等光学用品中使用光致变色(photochromic)玻璃,当光照射时会产生色变。质地均匀的大尺寸玻璃可用在玻璃激光中,其他如太阳能电池、光盘、显示元件上也常常使用;而光刻用的各种玻璃基片,光调制玻璃等在光电子领域中的应用将是指日可待的了。近来,这类光功能材料被称为光子(photonics)材料。这是在玻璃中加入添加物,冷却后使之析出微晶而成的晶化玻璃(crystallization glass),用它可以做锅、食器之类的东西。最近又出现了能作机械加工工具的工具(machinable)陶瓷,义齿材料,汽车排气用蜂巢结构,也有是代替大理石做人工建材来应用的。另外,玻璃可回收再利用,可回收再利用(returnable)玻璃,这是可再利用技术中的一个重要的方面。

9.2.3 有机材料(organic materials)

一般而言,把含碳化合物叫做有机化合物。该化合物中除碳以外的一般还含有氢、氮、氮、硫、卤素等元素。人类自古以来就把有机化合物作为材料来使用,例如,木(作建材、纸用),棉花,蚕丝(作衣料用),胶(作黏接剂用),漆(作涂料),皮革等。约从20世纪50年代开始,用石油作原料开始人工合成类似于上

述的天然物质了。因而，塑料，合成纤维，合成橡胶等就大量使用了，这些材料都是分子量为几万以下的高分子。而现在各种显示器中用的液晶则是低分子量的有机化合物。我们身边较多使用的金属有铁、铝等，较多使用的无机材料有玻璃、陶瓷、水泥等，此外大量使用的就是有机材料了。从早晨起床开始一直到晚上就寝，我们现代生活中会接触到各种各样的有机材料的制品。例如，家用电器的外壳，电线的外层，汽车的内装潢，轮胎，地板，壁纸，家具，浴缸，垃圾袋，胶带，隐形眼镜，输血袋，医用胶带，提包，鞋等，而且往往是一种材料并不限于只有一种用途，往往又和其他材料复合后再使用。例如，聚酯(PET)，将之成形为试管状之后，再吹塑成袋，若将其熔融后纺丝成聚酯纤维，若是薄膜可作磁带的基材，也有些是把玻璃纤维混入作为纤维强化塑料来使用，成型制成各种机械零部件。另外，像一次性相机、手机的外壳等也常用聚酯塑料，若将其发泡后可以做成盛装鱼肉用的盘子。可以这样说，我们生活中之所以能如此方便、舒适，是建立在有一个能大量生产和消费有机材料的系统之上的。当然，随之而来的是一个废弃物处理的社会问题了。因此我们所希望的是有一个使废弃物最大限度少的产品设计，而且其废弃物的流通系统能不断地改良。当然，这更应是即使废弃对地球也是无害的。总之，重视再生性的材料设计是要花精力才能得以进展的。

聚合物合金(polymer alloy)

两种或两种以上的高分子材料加工得到的多组分高分子材料，称为聚合物合金。一般而言，每一种高分子材料都具有各自不同的性质，把这些材料以物理、化学的方法组合而形成的材料，有望获得高性能、多功能的材料。由于能够应用有机合成化学，聚合物合金可比金属合金能得到设计更为多彩的材料，轮胎用的橡胶，耐冲击的塑料(ABS, HIPS 等)，仿麂皮织物，人造革等都已实用化了，人工心脏，人造血管等的生体材料的应用也正在研究中。由于今后对高分子材料要求是希望能更多种多样，

因此，合金化的问题更是摆在人们面前的一件大事。有人形容说，今后是要进入 ABC 时代了，其意义就是，A 是 Alloy(合金化)，B 是 Blend(混合化)，C 是 Composite(复合化)。

生物力学材料(biomechanical materials)

在对牙齿、骨骼、血管、内脏等人体内的各种部位的治疗中，常用移植的方法来代替原有的器官组织，因此就必须要寻求替代的材料，也有人称之为仿生功能材料(biomimetic material)。要选择重现人体功能的材料，其重要点在于：与人体的相容性，耐腐蚀性，无毒性等。现在，聚氨酯、聚烯烃类的高分子材料作为人工心脏和人工关节材料用得很多；磷灰石和氧化铝用于义齿，人造骨上，以及用铁、铬镍合金等材料来接骨也不在少数，更有甚者的是将此类性能复合后才使用的。

9.2.4 几种特殊功能材料

生物力学陶瓷(biomechanical ceramics)

在具有替代人类和动物生体组织功能的陶瓷中，随着高龄化和医学的进步，提出的要求也在不断的提高，最近刷牙粉也不是以研磨材料为主体，而是以羟基磷灰石来代替了。现已有不少厂家都报道了他们的做法。将牙齿变白这是许多广告上讲的，其实人类的牙齿并非真是白的，对于取模加工，制作人造齿冠，应用陶瓷是困难的，最近，用含镁的晶化玻璃，透辉石，在短时间可简单成型，这可以用石膏模压制成型，只需 1 小时就可使玻璃结晶化。除牙科外，接骨材料上也有用磷灰石陶瓷的。由于要与生体的相容性好，又要无毒，因此对陶瓷是寄以莫大希望的。

晶须(whisker)

把金属和无机化合物等的蒸气结晶固化，形成直径在几 μm 至几百 μm、长度为几十至几千 μm 的针状单晶物质，这种物质像猫的胡子一样，所以也称之为须晶(或晶须)。在一般结晶中

被称为位错的结晶出现后会使结构上易于变形，而在晶须中这种位错几乎没有，因而其变形就很困难。一般钢 1 mm^2 面积能承受的拉伸相当于 50 kg 物体的重量，而碳化硅的晶须只在几 μm 粗细能承受的拉伸就可达到相当于 1000 kg 物体的承重。

碳材料(carbon materials)

碳元素是一个原子序数为 6 的轻元素，它和人类生活有着非常密切的关系。形成生物的有机物大部分都是由含碳链的化合物构成的。燃料也大部分是碳的化合物，所谓“可燃”即是指碳和氧反应时发出能量而形成的。若氧含量减少，反应不完全碳(煤)的小颗粒在火焰中加热后会闪现明亮的光辉，残留未燃尽的碳的小颗粒收集后，就成了书法用的黑墨。把木材焖烧后会做成木炭，它能起吸附的作用，尤其是活性炭，由于它的表面积大，又有细孔，则可吸收气体分子。因此，冰箱的除臭剂和香烟的过滤嘴常用它。用石油来做炭黑可以用于做复印机的墨粉、橡胶中的增强剂，因此轮胎中用炭黑就很普遍。若把聚丙烯腈纤维在惰性气体氛围中加热到 2000℃ ~3000℃ 时就能制成碳素纤维了，碳素纤维常用于钓鱼竿、高尔夫球竿、网球拍上，更高级的是用在需要质轻高强的航空工业的零部件上，把该类纤维用三维织法编结后，在其空隙处浸入树脂，石墨化后则碳—碳间就复合成复合材料，就能制成 CC 组合式(碳—碳组合)，适用于航空工业的零部件。除一般碳的结构外，碳还有同素异构体：石墨、金刚石。石墨是由 6 个碳原子形成一个单元，如乌龟壳一样的正六角网状结构组成，常用于作电极材料，半导体材料，原子能反应炉的减速材料，日常生活中用的铅笔也是由石墨制成的。它的用途特别广。天然金刚石只限于在南非有出产，主要用于作宝石。1955 年首先在 3 万大气压，2000℃ 极限条件下合成而得人造金刚石，由于金属熔媒的开发，后来在更低的温度下也可大量合成，现在连研磨材料也常常用它了。最近由甲烷和氢来制备金刚石薄膜，而且可以想像将来用它来做成高温半导体。近年来，巴基球的发现对超导研究有了推进，其实，巴基球

系列也是一大类异构体。特别是圆筒状的碳纳米管(直径150nm),可作为贮氢材料,在今后的能源方面将会有应用。

当然,在微电子研究方向得到进展的同时,受到人们关注的还有^{14}C,这是一种碳的同位素,利用它可以作考古学上的年代判断,它为考古学年代判断提高精度作了很大的贡献。

超导材料(superconducting materials)

所谓超导状态是指电阻为零,强反磁性显示的状态,具有这种性质的材料称为超导材料。超导材料是和超低温技术紧密相连的,许多超导性质都是在超低温状态下才显现的,它是 1911 年从对水银的研究而发现的,1973 年发现的最高临界温度是 Nb_3Ge 的 23K。超导材料分为两大类,第一类是单体金属(如 Hg),第二类是合金、化合物(硫化物,氧化物),按照一般的逻辑推理,超导材料从单体金属研究后就转向合金,而合金的超导磁性也特强,它是常见磁铁的 10 倍以上,例如铌三锡线材的磁性就达到 20 T。1985 年在瑞士的 IBM 研究所中,两位博士用反向思维方法,对在常温下呈现为绝缘体的氧化物陶瓷作了研究,据他们 1986 年 4 月公开发表的结果由 Ba-La-Cu-O 组成的陶瓷在临界温度 40K 时,出现了超导状态,进而在 1987 年美国休斯顿大学的朱经武教授对 Ba-Y-Cu-O 系陶瓷进行研究得到 90K 的临界温度,美国对含 Ti 的陶瓷,日本对 $Ba_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 系陶瓷也做到 110K 的水平。由于液氮的温度是 77K,这样完全可以使用 150K 级的材料,衡量高温超导体除临界温度外还有一个指标就是临界电流密度 J_c,现在有望达到 $10^5 A/cm^2$,进一步若将其线材化后,它的应用和贡献应是无法估量的。

9.3 材料的复合化

9.3.1 复合材料(composite materials)

一般而言,性质不同的两种以上的基材组合在一起(通常是

把强度好的纤维素和带有胶黏剂的母材胶合起来)而得到的单一的材料,常具有优良的特性,例如,它有高的比强度,这种材料就称之为组合材料。GFRP 玻纤强化塑料(玻璃钢)即是在柔软的塑料中,把按一定取向的玻璃纤维有序排列进去,固化后而形成的。同理,若是母材用金属(如铝)就形成了纤维强化金属 FRM(fiber reinforced metal)。

杂化材料(hybrid materials)

杂化材料是在原子、分子水平上控制其组分把不同物质的原子、分子按一定规则人为有序地排列而形成的材料。前面所讲的复合材料其组织情况可由光学显微镜来进行宏观的观察分析,而杂化材料则必须由电子显微镜来从微观上进行观察分析。因此,这是两者区别较大的一点。杂化材料和原物质相比不仅有着完全不同的新的特性,而且有可能因原子分子水平上的相互作用而获得新的特性。"杂化"二字实际上又有着"混血""混成"的意思。例如,无机、有机的杂化材料,一般而言,人们都认为有机和无机就像油和水是不相容的,相互的关系有很大的不同。但若能兼有二者的特性,这就是杂化了(成了混血儿了)。这是与新材料的开发是紧密相连的。例如,在化学合成水玻璃中,若将纳米尺寸大小的有机高分子材料($1nm = 10^{-9} m$)与之相混并均匀混合就会杂化了。蔗糖和陶瓷也可制成透明的杂化物。其他如 TiO_2 的球体中将聚合物放进,可做成激光的振子,若把聚合物除去,它则是一个超微细的孔体了。估计今后这方面会有大的进展。

功能梯度材料(functionally gradient materials)

若对某种材料而言,我们希望它的外侧和内侧具有不同的功能,通常情况下常采用内、外侧分别贴上某种不同性能的材料。若两种材料相贴合则在接合界面处会存着不同的性质,这样易于产生应力以致损坏,若不是这样的结构,就像贝壳那样,它从外层开始到最内层一点一点地改变其性质,当其变化完成

后就成为一个性质在逐渐变化,具有一定的性能梯度的材料了。例如,返回式宇航舱其表面层要达 2000 K,内侧至少要有 1000 K 的承受温度,有些还要苛刻,如载人式返回宇航舱的内侧温度要使人能正常生活才行。这种材料可用 CVD(化学蒸发沉积),PVD(物理蒸发沉积),粒子烧结等各种方法来制备。

智能材料(intelligent materials)

随着外界条件的变化,其特性、结构也相应地变化,当受到致命损伤后,突发的危机尚未发生之前,能具备防护功能的材料,这就是智能材料。例如:①有一种传感器,它会告知你"痛!已经不行了!"这样,你就可以自我诊断了;②对受损伤口部分其本身具有自我修复功能;③对于环境的变化,有一个确切的响应,它有着一个调节器的作用,且能自己识别以适应环境。例如我们可以看到有些材料能形成致密的氧化层阻止继续氧化造成破坏,例如不锈钢和铝的氧化层某种程度上就是具备了这种自我修复的功能。

9.4 结构材料

高抗拉钢(high strength steel)

一般使用的普通钢比软钢的抗拉强度要高(达到 50～100 kgf/mm^2 的程度)。若将普通钢的成分改变并经热处理、用控制压延等新加工方法处理后,在保证同样的强度下,钢板厚度就可大大减少,而车辆轻量化后,燃油就节约了。对于抗拉强度超过 220 kg/mm^2 的钢被称之为高抗拉钢。

高强钛合金(high tensile titanium alloys)

高强钛合金主要用于航空、航天及宇宙开发上的结构材料、热交换器等耐腐蚀的合金的材料,其比强度(强度/重量)极大,强度好且质量轻,而且韧性好(弹性强),耐蚀性等都极为优秀。其代表的一例是含铝、钒的钛合金,其加工性好,焊接性能也良

好,常作为喷气式飞机的零部件材料来使用。

超硬质合金(cemental carbides; hard alloys)

超硬质合金是一种常用于切削,耐磨耗、耐冲击工具方面的高硬度、高强度合金,它是以钨碳化合物和钴(3%~25%)的合金为主体而构成的,其制造方法是把粒度为 1~2μm 的高纯度粉末混合、粉碎、干燥,用模具冲压成型后,在 1300~1500℃的温度下,真空中烧结 1~2 小时而制成的,其硬度可与金刚石相匹敌,其强度也能达到 270 kg/mm^2。最近又有把氮化钛被覆在表面使之硬化的做法。氮化钛膜是金黄色的,常用于汽轮机、钟表方面。

形状记忆合金(shape memory alloys)

镍钛两金属约为各半的组分所得的合金棒在室温下弯曲后再加热时,则棒又恢复到原来的直棒的形状了。这种合金把一定的形状一直记忆着,即使变形,当加热时它又回到原来的形状(称为形状记忆效果),见图 9.1,具有这种特性的合金被称为形状记忆合金,除 NiTi 合金外,价格低廉的也有铜合金、铁合金。

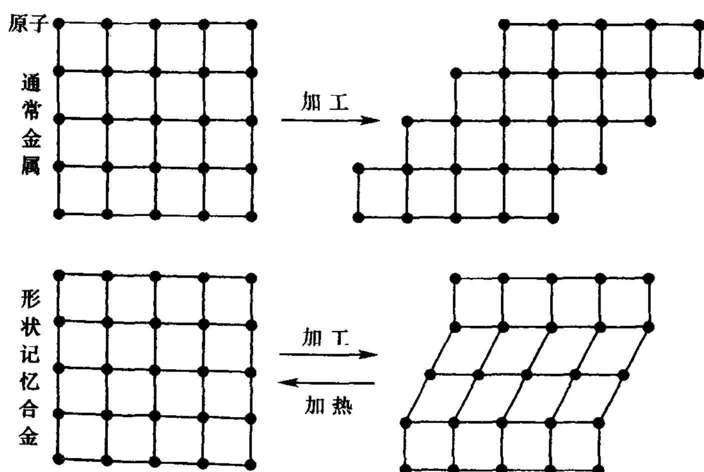


图 9.1　形状记忆合金工作原理图

利用其因温度差而形状变化的特性，常用于焊接困难而可靠性要求又特高的飞行系统中燃油管道的接头部分。另外，这种合金在某个温度范围内超过弹性限度，即使有大的变化，只要拉伸力返回为零，其形状尺寸仍然会返回到原位。具有与形状记忆合金原理相关的功能的合金被称为超弹性合金(superelastic alloys)或叫橡胶合金。它具有一般铁的伸缩量的10倍左右。高档妇女乳罩就有用它来制造的。

快速切削钢(free cutting steel)

切削加工中金属屑不粘刀具，很快都各自分散掉下，使切削过程很容易进行，这种钢叫做快速切削钢。

常见的有：硫快速切削钢，铅快速切削钢，钙快速切削钢。

快速切削不锈钢中还有的是把硫、铅快速切削钢复合的超快速切削钢，另外超快速切削钢中再添加碲后形成为超超快速切削钢。

由于工具摩擦生热的减少，高速切削就有了可能，它更适合于自动切削加工机械。

防振合金(high-damping alloys)

即使敲打也不发出声响，也就是具有吸收振动的特性的合金称之为吸振合金。

金属材料比高分子材料强度要好得多，但是也容易传递声音和振动，为了弥补其缺点，则应开发出在保持高强度的同时使声音、振动也衰减的材料。

超大规模集成电路(LSI)生产中，振动是绝对不能对之有影响的，现在已经开始应用防振结构材料来制造防振台，其他的防振机械装置上也有开始应用了。现在常为人们所熟知的防振合金有：铝锌合金、镁锆合金等。另外，作为防振、隔声材料也有在钢板间夹入塑料制成吸振钢板(high-damping steel sheet)，目前在洗衣机上有应用。

氧化铝/氧化硅/氧化锆

氧化铝是铝的氧化物(Al_2O_3),其熔点为2050℃,硬度仅次于金刚石,纯度高的氧化铝是绝缘的,其耐热性、耐药品性、强度等及其他许多性能也能和一般陶瓷一样,同时它又价格低廉。因此,有些陶瓷90%以上以氧化铝作为主要成分。

其用途有:汽车的火花塞,IC用基板,包装材料,利用其硬度的研磨材料,研磨机等。

在氧化铝中加少量的氧化铬形成的单晶是红宝石,它除了可作装饰外,还可作为激光器中的材料来使用,钠灯中用的芯柱是由氧化铝粉烧结而成的可以透光的氧化铝(称为洛卡洛克斯白刚玉 Lucalox)。氧化铝高温处理加工成线状物叫做氧化铝纤维。它有望用于耐火材料作复合强化纤维之用。

在使用包裹氧化铝的同时,把陶瓷中核改为氧化硅(SiO_2),另外,按照其结晶形式要求不同也用石英、水晶、石英玻璃等不同材料。将纤维状氧化硅固化到绝热瓷砖上,可作为宇航站的外壁来使用。

氧化锆是锆的氧化物,由于它具有高强度和高韧性,可作为刮胡子刀片、圆珠笔的圆珠、陶瓷剪刀、陶瓷小刀等日常用品。另外,还可用作为氧传感器、加速度传感器、光纤接口的圆箍(为了使光纤整齐排列的圆筒套管)。另外,由于要研究氧离子在燃料电池(fuel cell)中的活动,则要在金属表面熔射上硬质隔热涂层膜,可以用氧化锆,这也是它的一个重要的用途。它的单晶是立方晶系的氧化锆(cubic zircona),另外作为金刚石类似物它也常在饰品中使用。

工程陶瓷(engineering ceramics)

用于机械零部件上的硬度、韧性都优良的陶瓷称之为工程陶瓷,一般而言陶瓷强于抗压,而弱于抵制弯曲和伸长,特别有伤痕时则更易被破坏。若克服了上述这些局限,开发在极端残酷的情况下也能使用的陶瓷是各国都极为重视的问题。其目标

就是要开发出陶瓷制成的汽轮机、汽车发动机，为此可在这些陶瓷中加入氮化硅、碳化硅等非氧化物陶瓷(non-oxide ceramics)来制成。此外，可进行高精度机械加工的陶瓷工具 CBN(立方晶系氮化硼)等超硬质陶瓷也被一一研究开发出来。

为了使陶瓷的力学性能提高，现有人提出利用高度精确控制其组织结构的方法，现在的协同效果型陶瓷(synergy ceramics)正在研究开发中。

酰胺纤维(aramid fiber)

由芳香族而制得的聚酰胺纤维，它比通常的有机纤维更具有大的拉伸强度和弹性，耐热性也好，它的名称由 1972 年美国联邦调查局(FTC)确定，它区别于以前由脂肪族聚酰胺得到的尼龙材料。杜邦公司已生产的电缆线，日本帝人公司的 HM-50 也都是聚酰胺的产品的代表。

在这类纤维中有一种叫凯普勒的材料，其密度是铁的 1/5，拉伸强度比玻璃、钢铁要大，其比强度比钢铁大 7 倍，比玻璃大 2 倍，常作为缆索，或编结为缆绳等来使用，特别用于海底电缆、织物状防弹衣。它又可作为石棉的代用品做制动器、轮胎帘子线，以及用于宇航中的纤维强化塑料，印刷线路板基材等。

高分子液晶(liquid crystal polymer)

在溶液或熔融状态下能显示液晶性能的高分子材料被称为高分子液晶，由它制成的纤维或其他素材具有高的耐热性和强度。由溶液而生成的液晶称为溶致(lyotropic)液晶，熔融状态下生成的液晶被叫做热致(thermotropic)液晶。合成这种高分子的主链是直链状。形成的溶致液晶，经纺丝而得到的纤维称液晶纺丝(liquid crystal spinning)。液晶纺丝因其液晶状态有高度整齐的分子取向，并按此方向排列而固定下来，因而有高强度和高弹性率。这种纤维从宇宙飞船、航空器机械部分，一直到常见的体育用品都有广泛的应用，杜邦公司的“凯普勒”材料就是从

硫酸溶液中经液晶纺丝而得的高强力纤维。另外,也有用聚苯噻唑来纺丝的,它比“凯普勒”还要好。另外可从共聚的聚酯来开发热致液晶,作为高强度的塑料制品已经商品化了,被称为自我补强塑料(self-reinforced plastics),在冷冻室、经受温度考验的炉子密闭容器上使用,在汽车、电气、电子、航空航天等领域中都有应用。

生体高分子中DNA、RNA、磷脂等也是溶致液晶,生物液晶方向的基础研究也在开展中。

工程塑料(engineering plastics)

有耐温、高强、耐磨耗的优秀性能,又能广泛用于汽车、电子仪器等领域中的高性能塑料材料被称为工程塑料。当然聚乙烯、聚苯乙烯等制成的廉价的、一次性使用的薄膜、杂物袋等与工程塑料是有区别的,不过,要下个定义作明确的区分也很难。

一般情况下,我们常将工程塑料分为五大类合称为五大工程塑料:即:尼龙、聚碳酸酯(PC)、聚苯撑氧(PPO)、聚甲苯(POM)、聚丁烯对苯二酸酯(PBT)等五大类。此外,ABS树脂、聚酯(PET)也都是由上述材料改性而成的。

最近,把尼龙、POM、PPO和橡胶合金化后形成复合树脂的项目普遍增加了,近年来把五大工程塑料的性能再提高而开发新的工程塑料的工作正在加强,这种新产品被称之为特殊工程塑料或者叫超级工程塑料。例如PES, PEEK, PPS, PI等都属于特殊工程塑料,这些材料的一些特性如超耐热性、超高弹性、高强度等都和铁、陶瓷等相近了,但是由于量少、价高只是主要用在军事、航空上。

9.5 特殊用途材料

9.5.1 能源相关的材料

金属间化合物(intermetallic compound)

不同的两种金属元素,或是一种金属与另一非金属元素间

形成的化合物,形成了与原来两元素完全不同的晶体结构。两种元素原子按一定的规则排列,就像化合物,它形成全新的不同的性质。这种金属间化合物是功能性新材料,受到人们的瞩目,如:形状记忆合金(NiTi)、耐热材料用化合物(Ni_3Al, TiAl)、贮氢合金($LaNi_5$)、强永磁体($SmCo_5$)、超导化合物(Nb_3Sn)、超硬工具用化合物(WC, TiN)等各种功能材料。金属间化合物最大的缺点是较脆,为此,人们正在努力克服它,如加一些硼元素到Ni_3Al当中,脆度就有显著改善,它们的用途正在不断扩大。

贮氢合金(metallic alloys for hydrogen storage)

能够大量吸进氢,必要时又能取出的合金就称为贮氢合金。镧、镍合金,铁、钛合金等材料已为大家所熟知。由于氢燃烧时形成水,是一个绿色能源的产生机构而备受人们注目。贮氢合金和一般贮、运时用的高压气瓶相比只有原来的1/3~1/5的压力且没有爆炸的危险。由于氢气放出、吸入的同时会伴有发热、吸热现象,则又可作为冷、暖空调机来开发,甚至也还有用它做热泵的工厂呢!

非磁钢(non-magnetic steels)

核聚变、磁流体发电、线性电机车等,常使用超导磁铁。这样,周围环境也会受到强磁场的影响,因此,这就需要开发一种不受磁场影响的结构材料,如镍-铬系的不锈钢,它与高锰钢是区别很大的,它的磁化率低。由于超导磁铁在液氦温度附近使用,所以需要寻求在极低温下韧性(弹性强)、可焊性、可切削性等的特性都优良的材料。

方向性硅钢(grain-oriented electrical Si-steel sheets)

高透磁率的材料的一种用途是用作电力变压器的铁心,其含硅量为3.5%左右,这种钢就叫方向性硅钢。由于铁的结晶方向不同其磁化的程度有很大的不同,所以是在其最易磁化的方向上压延并用来做变压器。磁化程度的容易与否除了结晶方向外,晶粒的大小,晶粒内各种结构缺陷对其也是有影响的。压

延、淬火并多次反复进行，最终控制压延方向和所需要的结晶方向的不一致程度在 3%～7%，得到晶粒粗大的薄板（0.5mm 以下），则可提供使用。

9.5.2 环境保护相关的材料

生态材料（eco materials）

所谓“生态”材料，就是某材料，无论是在它被制造出来时，或是使用时，还是直至它使用完了时，都考虑到了资源保护、再利用、保护地球环境、节省能源等问题，因此，这个名词不论是过去或现在都是和开发、进展紧密结合在一起的。

材料使用的一个目的应是其特性优良，但即使它有某个特别优良的特性，而若其他的附属的功能不好，它也不能使用。材料使用的另一个目的则是能够价格低廉，这也是材料的一个重要的性质，由于便宜的材料受人喜爱，它就能长期在人类生活中使用。所谓生态材料应超越时代，要以更广阔的视角来看待、来定义。这种材料应是最便宜的，从长远的观念来看时，生态材料是永存的。

生物可降解塑料（biodegradable plastics）

对不能自然分解的塑料废弃物，若选用微生物（生物分解）的生态系统时，理应可分解而没有垃圾问题，由此来对待环境的考虑是今后开发新塑料的基础。最近，也开始对洗发香波的容器、一次性使用的刮胡子刀柄等部分使用生物分解法了。生物分解塑料的开发应考虑有以下几种情况：

(1) 用微生物来生产烃基与烯系的聚酯；

(2) 以植物原料（纤维素、淀粉等），动物原料（虾、蟹的甲壳素所含的甲壳质）为天然的原料，或以其为原料合成的高分子；

(3) 用原来就有生物分解性能的聚乙酰胺合成高分子以及其他通用塑料（非生物分解性）及其他塑料合金。

另外，正在积极努力使材料的安全性的综合评价、价格低廉

化方面等指标提高，不仅可达到使(3)中的材料及聚乙酰胺埋入土中后就分解，对外分解性的塑料使之纤维化后更能成为土壤的改良剂，这方面也都有报道。

木质材料(woody materials)

木材的废弃物及残材可以加工成小片再加胶黏剂粘合加工成品，也就是说可以做成胶合板或和纸片复合再成板，还有把木片加工成微细的粉末，和树脂配合后再成形，这样不论是从外观上来看或是触摸后在感觉上都和天然木材一样，几乎可乱真。和装饰板不同，即使需要切削它时，它也不会失去木质感。木材历来都是作为建筑工具和家具的芯材来使用的，也有需要考虑选振动特性优良的材料如音响的喇叭箱等。另外，还要克服天然木料的缺点，使之不易腐烂，不易燃烧，尺寸不变化等，因而在厨房等处也开始用高级建材了。除了以上所讲的制造方法外，使木板内部浸渗进塑料溶液，来改良其特性，这既保证了木材的特性得以发挥，同时又兼备了化学修饰后具有的高耐久性，达到高功能化的目的，现在对于木质复合材料技术研究的组织都在建立中。

高吸水聚合物(super absorbent polymer)

这是指能吸收本身自重数十倍以至数百倍水的聚合物。历来，在吸水材料方面都运用脱脂棉、布等材料，它主要是利用在纤维间有毛细管，由于毛细管而吸水，但其吸水量小，当稍施加压力时，它又简单地将水排出，这和高吸水聚合物不同。高吸水聚合物吸水量大，稍稍施加压力时水不会排出。高吸水性聚合物是在高分子电解质中，用架桥法把一些不溶性物质导入高分子中去。例如：在淀粉、纤维素中把聚丙腈接枝共聚上去的材料；丙烯酸和乙烯醇的聚凝而成的材料，这些材料的粉末和纤维状材料已经实用化，约在10年前就已用于妇女用的卫生巾了。后来针对婴儿用的尿片也推出来了，现在世界上每年有10万吨的用量，其中约有一半是日本生产的。除了纸尿片以外的卫生

用品，园艺用的土壤保水剂，育苗用的专用盒，食品流通范围内的保鲜剂等也都开始用这种材料。特别是对中国的沙漠地区的绿化，中、日共同制订计划，正在准备大量使用高吸水性树脂作为水土保持载体来改造沙漠缺水的状态。

中空丝(hollow fiber)

衣料用的纤维的直径一般是 20～30μm，这种细纤维中有空洞存在，也就是说像吸管一样的中空纤维丝，这种材料就称为中空丝。其中空结构有如下特点：①体积大而轻；②绝热效果好；③光漫反射但不耀眼；④中空部因有毛细管而吸水性良好。由于以上特点，它可作被毯、地毯、棉毛衫裤、运动服装等，也用其作为过滤的滤材，也就是说，作为过滤分离膜的高分子材料，若是中空丝时，则单位体积的分离膜面积就很大，其实用效果就会很好。现在医院的人工透析，半导体工业用的超纯水制造，富氧化，氢分离等方面都使用中空纤维。将中空丝集束在管状的压力容器内称之为模块，医院中的人工肾膜透析用的模块就是用塑料中空丝集束而成的，最近，也有用活性炭和中空丝结合组成小型模块，装在自来水龙头上，则它可提供优质水。

环境改善陶瓷(陶瓷过滤器)(ceramics filter)

当使用陶瓷过滤器时，能把腐败菌直接去除掉，例如过滤酒时，可得到非常新鲜的无杂菌酒，另外，在游泳池中，一个人每一小时游泳发出的汗量是 850ml，同时头发等也要污染水，若使用新开发的专用陶瓷微粒，过滤能力就大幅度上升。另外，以二氧化钛作催化剂，可使一些有机物分解，现在还有用陶瓷多孔体材料实现氢、氧分离的功能。

热可塑性弹性材料(thermoplastic elastomer)

高温下，一般热可塑性塑料可以加工成形，其成形品在常温下为具有如橡胶特性的高分子材料，这就是热可塑弹性材料。常用的橡胶制品，如轮胎、皮带等都是在橡胶分子中添加炭黑和填充剂硫黄及硫促进剂等药品，高温下硫起着使分子交联的作

用，像架起桥梁一样使分子间联结起来，这样就形成了高温弹性材料。而热可塑性材料无需加硫、充填等工艺，这样它在高温时有可塑性，在低温下固化有一定强度，当再次高温时它仍能具有可塑性，因而可再生利用。聚苯乙烯可做成鞋底的粘接剂，酯、醚系可做汽车和日常用品。烯烃类可作汽车内装潢，其用途很广。

9.5.3 与信息通信相关联材料

磁性材料(magnetic materials)

大型发电机用的线圈的铁芯，小的磁头的磁芯以及磁带等与磁性相关的材料，称之为磁性材料，其用途极广。例如，线圈的铁芯中要使磁力线束高效地通过(高透磁率 high permeability)，另外，它在高速下，N 极和 S 极高速转换时，其损失能量(铁耗)要小，这就要软磁性材料或者说是高透磁率材料(high magnetic permeability materials)。永久磁铁在一次磁化的场合下，要求磁力始终不会减少(高保磁力 high coercive force)，这就是硬(hard)磁性材料。

最近含稀土类元素的硬磁性材料已成为研究的主流，如钐、钴磁铁，钕铁硼稀土类烧结磁铁等，即所谓"稀土类磁铁"(rare earth magnet)。航空工业中小型、强力的磁铁是必须的，例如机场高速地面运输机就用到它，其他还有电脑中的硬盘等需要它。

磁性流体(magnetic fluid)

永久磁铁和磁性材料几乎都是固体。而所谓磁性流体是惟一的液体状的磁性材料。磁性流体是把直径为 10^{-8} m 的四氧化三铁强磁粒子放入表面活性剂中去处理，经处理后得到在溶液中均匀分散的溶液，表观上看流体自身具有磁性的特征，这本来是宇宙开发中得到的产品，现在却不断扩大有了更多的用途，特别是在磁密封、喇叭的阻尼等特性的改善上都已达到了实用

化。

电子陶瓷(electro ceramics)

这主要是指具有介电特性、导电特性、电子发射特性等电学功能特性的陶瓷,因而称之为电子陶瓷。陶瓷介电材料主要用途是在电容器、音响设备、电脑、照相机、汽车等各种各样产品上。一般的结构几乎都是单层圆片式和叠层薄片式。

由于叠层薄片式常用在集成电路中作为电容器,为此它就必须尽可能小型化,大容量。这样陶瓷介电材料和电极交互重叠积层在几十层以上(每层在 10μm 以下)才构成一个电容器。这种电容常作为温度补偿用和高介电常数电容用。另外,把电作用变换为机械运动的驱动器(actuator)中用陶瓷的也不少。由此也能做出马达来。另外,在我们周围生活中自动门、侵入报警的红外传感器、消除电视噪声信号的压电材料都用电子陶瓷,总之,电子陶瓷的各种各样应用所需要的材料的开发和实用化都在进行中,现已成为精细陶瓷的主要核心部分了。日本生产的电子陶瓷几乎占世界产量的 50%以上。近年来,电子陶瓷薄膜更受人注目,特别是 PZT(锆钛酸铅)薄膜已被开发利用在 FRAM、DRAM 等存储装置上。

光陶瓷(opto ceramics)

一般来说,除了玻璃以外,烧结而成的陶瓷是不透明的,但是若选定原料后,在制造上下功夫,也是能透光的。现在已经有 40 种以上的透光陶瓷(translucent ceramics)了。一般而言,此类产品具有高机械强度,且有耐高温、耐氧化、耐化学药品等优良的特性。而且,改变成分后其电特性也可以达到所期望的要求。在应用上,原子能反应炉上的窥视窗、高压钠灯、光存储器、光变频器、激光振子等上面都有应用。特别是 PLZT(镧锆钛酸铅),具有在施加电压后其光散射的程度变化的特性,因而在高速快门、光存储器等方面,光陶瓷材料有着引人瞩目的前景。

光导抗蚀材料(感光胶或光刻胶)(photoresist)

光、放射线照射时,只有被照射的部分结构发生变化,而后溶于溶媒中(称为负型),或相反,被照射部分不溶于溶媒中(称为正型),这样的高分子材料叫做光导抗蚀材料。由于它是用光照射而使材料物性发生变化,也被称为感光树脂或感光高聚物(photosensitive polymer),IC、LIC、印刷线路板,报纸的印刷版等都是在基板上涂上感光胶(树脂),用光照射,再显影而得凹凸不平的斑点,用它来完成文字、图像要求的。例如:IC回路制造中是按图9.2所示的工序进行的。

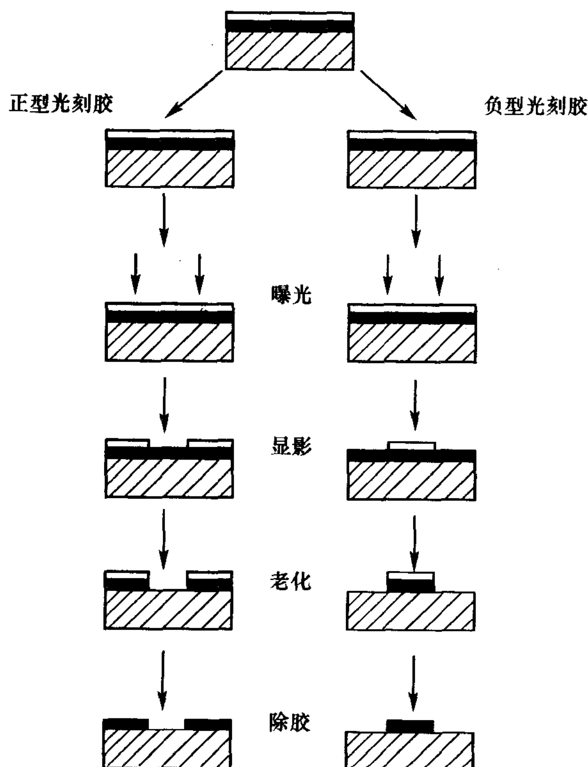


图9.2 光石版印刷流程图

① 使硅片表面氧化而得二氧化硅，在二氧化硅膜上涂布感光胶，厚度为数 μm 以下。

② 光从 IC 回路网格上的点、线条上通过，照到感光胶上。

③ 在溶媒中显影（负型感光胶只有在被照部分被溶解而洗掉）。

④ 对之进行老化（氢氟酸中进行），这样就有溶出的部分的二氧化硅被老化。

⑤ 在其上进行配线。

其中③的显影工程中残留的部分，也能耐老化而不被侵蚀，所以叫抗蚀。常用作负型抗蚀材料有桂皮酸乙烯、聚甲苯丁二烯等，而正型抗蚀材料有醌 C 酸酚醛树脂等。另外，点和线条越细则 IC、LIC 的集成度越高，线幅在 1μm 以下采用紫外线（200～260nm）、电子射线、X 射线作为照射源。对聚甲基丙烯酸甲酯系的电子射线抗蚀材料可以做到 20 nm 以下的线幅。近年来，又开发出 500℃ 以上的耐热抗蚀材料，图形形成后它仍作为 IC 的绝缘膜来使用。石版印刷英语中叫 lithography，而利用时是光抗蚀材料，所以也叫光石版印刷（optical lithography）。近年来在 LSI 已经用上，并用电脑来进行设计了。

光致变色高分子（photochromic polymer）

当光照射时会着色或色调变化，或是其他波长的光或热照射而变色，在一定波长光照射时又会返回原来的色调的现象叫做光致变色现象，这种高分子材料叫做光致变色高分子。它在光记录材料、调光材料、非线型光学元件等方面的应用的讨论不少。更为广义地说，由于光照射，材料尺寸、导电性、物质透过性、极性等物性有可逆变化的高分子也包含于这一类型，因此又常称之为光响应分子（photo-sensitive polymer）。

醌茜等醌系色素首次受光照时对光有吸收，再用同样波长光照射时，它不吸收，让其透过，这叫做 PHB（photochemical hole burning）材料。把 PHB 色素混入高分子材料可以开发出超高

密度光记录材料。

压电性高分子/热电性高分子(piezoelectric polymer/pyro-electric polymer)

具有高压电性和热电性的高分子材料叫压电高分子/热电高分子。

聚偏二氟乙烯,三氟乙烯及其共聚物,就有这种性质。这种高分子材料易变形且能大面积成形,因此常作为机器人的触觉传感材料。另外,由其做成的红外传感器也在许多部门中独立应用。

光电子材料(photo - electric materials)

光电子材料是指光电子技术中所用的材料。光电子技术发展的趋势是,与微电子技术相结合,进行光、电结合的信息传输与处理,充分开发和利用化合物、半导体等各种材料的优异性能,制作激光器、光探测器、光开关、光逻辑功能器件以及高速电子器件等,以发展新一代集成光电子器件与技术。光电子技术是现代信息科学技术的重要组成部分。

新材料是新技术的基础与先导,这一点在光电子技术中表现得十分突出。例如,新的化合物半导体材料的研制,导致了新型激光器和光探测器的出现。20 世纪 70 年代初,当石英光纤的损耗降至 20 分贝/千米时,光纤通信才有可能实现;90 年代,可擦写磁光介质实用化以后,光盘存储技术才有可能与磁盘存储技术在计算机外部设备上竞争。

光电子材料的种类很多,从无机物到有机物,从单晶到非晶,从半导体到绝缘体,可以列出几十种。尽管光电子材料名目繁多,功能各异,但它们都是以在外界物理场(如光、电、磁、声和热)作用下,光与各种材料相互作用所产生的物理效应为基础的。通常,一种材料可以产生多种物理效应,并能满足几种功能的要求。半导体材料的物理效应较为广泛,因此在光电子材料中半导体材料占有十分重要的地位。用半导体制成的器件具有

响应快,易于集成的优点。下面以功能应用为线索,介绍几种主要的光电子材料。

(1) 激光材料

激光的出现促进了光电子技术的形成和发展。目前,激光技术是光电子技术的核心组成部分。激光材料用于制作不同波长、不同类别和不同功率的激光器。在光电子信息技术中广泛应用半导体激光器,它具有体积小、效率高和易于集成的优点。激光管和发光管都利用半导体化合物做材料,例如,GaP(红—绿),CdS(黄—红)等。1993 年在 GaN 材料的 p 型掺杂上取得了突破,GaN 基材料成为蓝绿光发光材料的研究热点,已先后研制出 GaN 基蓝光发光管和 InGaN 量子阱绿光发光管。GaN 是宽禁带半导体材料,是制作高、大功率,耐高温和抗辐射器件及电路的理想材料。目前,GaN 基材料的研究重点已转向蓝绿光激光器,因为它在高密度信息存贮、激光打印、深海通信等方面有着广阔的应用前景和巨大的潜在市场,该领域的国际竞争异常激烈。此外,在光通信技术中,作为发光源的激光器也主要用化合物半导体制成。

(2) 光存储材料

光盘存储技术中,存储介质材料是最关键的。随着存储介质的发展,光盘存储经历了只读式、一次写入多次读出和可擦写方式等不同阶段。前两种光盘介质材料是烧蚀型的,即材料吸收光能而产生热烧蚀,形成小穴或气泡,利用小穴或气泡与周围的反射条件不同而达到检出信号的目的。一般使用碲基合金和有机染料作为材料。

可擦写光盘介质材料有两类:磁光型和相变型。磁光型介质利用光热效应使记录点的磁畴方向与四周相反,而磁畴的取向是可逆的,在磁性材料的居里温度附近记录,可实现擦除和重写。磁光型光盘材料常用稀土-过渡元素合金的非晶薄膜(如 GdCo, TbFe 等),容易制成大尺寸均匀膜。相变型光盘利用介质从晶态到非晶态,或由一种晶态到另一种晶态的可逆变化,而

两种状态有反射率的差别，从而实现可擦重写。相变型光盘材料主要采用低熔点半导体材料（如 GeTe, SbSe 等）或低熔点金属（如铜基、银基合金等）。

光存储密度随使用光波波长的变短而成倍地增长。90 年代末出现了 GaN 蓝色激光，下一步的发展方向是开发适合蓝绿激光波长的光盘材料。此外，由于光存储技术的面密度已接近光学衍射极限，国际上正在寻找下一个光存储技术，如：三维光存储技术、全息存储技术和近场光存储等。对于这些新的存储技术，关键还是要开发出可实用的光存储材料。

（3）光电子控制元件材料

这种材料用于制作光电子技术中起开关、调制、隔离、变频等作用的元件。在光电子信息系统中需要用光调制器将信息（按时间或空间）加载到光载波上，并通过光开关将光信号在时间或空间上进行切换，以实现网络光路中的光交换。这类功能元件主要应用光学非线性材料来制备。重要的电光材料有 $LiNbO_3$、磷酸二氢钾等晶体；磁光材料有钇铁石榴石等。

20 世纪 80 年代末由于多层半导体异质结构可导致极强电光效应的发现，使半导体电光材料的器件的研究变得活跃起来。90 年代，一种基于量子阱材料中电荷迁移现象的自电光效应器件，受到人们的重视，利用这一效应可做成光开关。

（4）光电子集成化材料

像微电子器件的发展一样，光电子器件必然走向集成化。早在 20 世纪 70 年代初，科学家在致力于导波光学集成技术研究的同时，提出了光电子集成。前者是从光学系统固体化、集成化考虑，而后者试图将光学器件与电子器件集成在同一芯片上。以往用于光集成的主要材料是石英和 $LiNbO_3$。80 年代情况发生了很大变化，首先是在硅衬底上生长 SiO_2 薄膜，然后制备波导及波导器件取得了进展；另一方面的进展是，直接在硅材料中制作波导及波导器件，亦称全硅光集成技术。人们期望在微电子技术中起主要作用的硅材料，也能在光集成技术中发挥重要

作用。然而，从目前的发展看，不是纯粹的光集成，而是光电子集成更为人们所关注。多功能量子阱结构材料已被公认为是实现光电子集成的最适宜材料，半绝缘衬底平面化集成结构被认为是获得高性能光电子集成芯片的可能途径。

导电高分子(conducting polymer)

一般认为，塑料不导电，因此塑料常被用做普通电缆的绝缘层。20 世纪 70 年代，日本东京工业大学的白川英树为了把聚乙炔做成膜状物，发明了一种先使催化剂在不溶性溶剂中成膜，然后利用乙炔气的分压来控制聚乙炔在催化剂薄膜上聚合速率的方法，从而制得了具有铜颜色的聚乙炔薄膜。一次，白川的研究生在做这项实验时，错误地把催化剂的用量加大了 1000 倍，结果得到了一种银白色的聚乙炔薄膜。它们虽然有金属光泽，但却不导电。

1976 年，美国宾夕法尼亚大学的马克迪尔米德到白川的实验室访问时，对聚乙炔为什么会变成银白色薄膜产生了兴趣。1977 年，白川应邀来到美国，与马克迪尔米德和黑格一起从事用卤素处理银白色聚乙炔薄膜的研究。这是与经典的半导体掺杂相类似的一种试图改变材料导电性的手段，结果发现掺碘后聚乙炔薄膜的电导率增加了 10^9 倍，达到 10^5S/m，进入了导电材料之列。从此，聚乙炔作为一种导电高分子吸引了众多的物理学家和化学家对其进行系统的研究。继聚乙炔之后，又发现和制成了几十个可导电的品种，其中有聚对苯、聚吡咯、聚噻吩、聚苯胺和聚对亚苯乙烯等。

关于导电聚合物的导电机理，是一个尚未完全解决的问题。在开始阶段，人们借助传统的半导体理论来解释高分子的导电现象，认为长链共轭分子中的 π 电子的最高占有轨道和最低空轨道分别形成连续的价带和导带，它们之间存在能隙。在无激发条件下，价带填满电子而导带完全空着，因此表现为绝缘体。在激发(包括光、热、掺杂)条件下，价带中失去电子形成空穴或导带获得电子。这些载流子的浓度和迁移率决定电导率的大

小。能带理论可以说明许多聚合物的导电现象，但是它对导电聚合物的许多电学、光谱和磁学行为，不能作出合理的解释。另一方面，人们根据导电聚合物长链结构的特点，提出了孤子理论和极化子理论。

导电聚合物导电行为的多样性，决定了它具有多方面的应用前景。例如：

(1) 可充电电池

导电聚合物可以进行氧化还原掺杂和去掺杂，并且可以通过电极反应来实现，这就决定了它可以用作可充电电池的电极材料。1981年，第一个聚乙炔电池采用聚乙炔膜为正极，锂片为负极，$LiClO_4$ 作为电解质和碳酸丙二酯作为溶剂。后来发现聚吡咯和聚苯胺比聚乙炔有更高的掺杂程度和优异的稳定性，因而大力开发聚吡咯和聚苯胺电池。

(2) 二极管和三极管

导电聚合物在一定掺杂程度上呈现半导体性质，因而可能制成二极管或三极管。1986年，日本用聚噻吩制成了场效应管。

(3) 传感器和检测器

导电聚合物的导电性与掺杂有关，任何外界因素如能改变掺杂的浓度，则可改变样品的电导率，变化幅度可达5～10个数量级，因而导电聚合物可以感知周围环境的变化，充当传感器和检测器。

自1977年黑格、马克迪尔米德和白川英树在塑料导电研究上领先取得突破以来，导电高分子科学技术取得了长足的进步，导电聚合物已成为对物理学家和化学家都具有重要意义的研究领域。目前，导电塑料已广泛用于许多工业领域，如：抗电磁辐射的计算机视保屏、能过滤太阳光的“智能”玻璃窗等。此外，导电聚合物还在发光二极管、太阳能电池、移动电话和微型电视显示装置等领域不断找到新的用武之地。导电聚合物的研究成果，还对分子电子学的迅速发展起到推动作用。将来，人类将制

造由单分子组成的晶体管和其他电子元件，这将极大地提高计算机的速度、减少其体积。届时，今天所用的计算机可缩小到装在一只手表里。2000年度诺贝尔化学奖正是授予了在导电聚合物领域作出开创性贡献的科学家。

第十讲 原子核与基本粒子

对物质结构的研究,已经得出了玻尔模型,而且又可用薛定谔方程来对结构简单的氢原子进行定量计算了。这时,科学家又把视线转向半径只有原子线度万分之一大小而质量却占有大部分原子质量的“核”。“原子核是什么?”“原子核是什么构成的?”“原子核能不能再分?”……这些很自然地成为人们关心的问题,也就是科学家们研究的目标了。这就形成了新的物理分支——原子核物理学和基本粒子物理学。

10.1 核结构与核裂变

天然放射性的发现,前面已经讲过。卢瑟福为了确定α射线的本性,进行了多年的研究。早在1899年,他根据放射性辐射的穿透本领,就区别了α射线和β射线;1903年,他从磁场使射线偏转的实验中发现α射线的荷质比和氦原子相同;1909年,他同罗伊兹(Thomas Royds)用光谱方法证实α粒子是氦离子。1911年,卢瑟福提出了原子结构的有核模型,为原子物理和原子核物理的发展奠定了基础。

就在这个期间,人们发现存在着化学性质相同而原子量不同的原子。J.J.汤姆孙在1910~1911年间利用偏转法对“阳射线”的质量进行测定发现,“阳射线”的质量随不同气体而异,原来,它们是失去一个或多个电子的原子;他还发现,氖元素是由20倍和22倍氢质量的两类原子组成的。1913年,索第根据他所做的放射性实验,认识到存在着化学性质完全相同但质量不同的若干元素,他把它们叫做“同位素(isotope)”,意思是在周期表上位于相同的位置。索第还推断,作为铀放射系列终点的铅

的原子量应为 206，作为钍放射系列终点的原子量是 208。他的预言后来为实验所证实。

在此基础上，索第假定，原子核是由 α 粒子（可能还有氢原子）和电子组成的。这样，到 1913 年，人们认为，原子核中包含有足够数量的 α 粒子和电子。前者是为了解释元素的原子量所必需的，后者是为了说明元素处于周期表中的相应位置。

既然原子核是由粒子构成的，可否用轰击一个粒子击出一个或几个粒子呢？

1919 年，卢瑟福做了用镭放射出 α 粒子去轰击氮原子核的实验。从氮中释放一个射程长于 α 粒子的粒子，卢瑟福认为这里"由于氮原子（核）受到在与快速 α 粒子相碰时所产生的巨大的力的作用而解体，而此时释放出的氢原子乃是氮核的组成部分。"卢瑟福把它叫做"质子"。这样，在 20 世纪 20 年代，原子核包含有质子已被人们所公认，也就是原子核是由带负电的电子和带正电的质子所组成的。

但是，人们不久就发现，原子核由质子和电子组成的假说遇到了严重的困难。1925 年，乌伦贝克（George Eugene Uhlenbeck）和古兹米特（Semuel Abraham Goudsmit）根据光谱提出，电子具有自旋，它自旋的量子数等于 1/2；很快就弄清楚了，质子的自旋也等于 1/2。这样，对氮核来说，由于它有 14 个质子和 7 个电子，因而这些粒子的总自旋数应取分数值。然而，实验表明，氮原子核的自旋等于 1。原子核的"质子－电子"假说遇到的另一个困难是，根据海森伯 1927 年提出的不确定性原理，把电子束缚在很小的核的体积内，它的动量将有很大的不确定性，因而，它在核内逗留的时间就不可能超过几分之一秒。这些都使人们怀疑原子核内可能有其他粒子存在。

首先发现原子核中有中子的是查德威克，中子的发现对核物理的发展有着重要意义。

J. 查德威克（James Chadwick, 1891—1974）于 1891 年 10 月 20 日生于英国的曼彻斯特。1908 年以前他曾在曼彻斯特高级

中学读书,1911年,毕业于曼彻斯特大学物理专业。此后两年中,查德威克在卢瑟福的指导下,在曼彻斯特物理实验室从事各种放射性现象的研究,1913年获硕士学位。同年,他到柏林夏洛滕堡技术物理研究所,在盖革(Hans Geiger,1882—1945)教授的指导下继续从事原子物理的研究工作。他于1919年回到英国,继续在卢瑟福的指导下工作。在剑桥大学,他参加了卢瑟福用α粒子轰击轻元素蜕变的研究工作,并对原子核的特性和结构进行了研究。

1921年至1935年间,查德威克应聘到冈维尔和凯恩斯学院工作,1923年到1935年间任卡文迪什实验室副研究主任,1927年,被选为英国皇家学会会员。

1932年,查德威克发现了中子,同年获得皇家学会休斯奖章;1935年因发现中子获诺贝尔物理奖。就在这一年,被推选主持利物浦大学昂琼斯物理学讲席。

1943到1946年,查德威克去美国工作,担任制造原子弹的曼哈顿计划的英国代表团团长。回国后,1948到1959年任剑桥大学冈维尔和凯恩斯学院院长,致力于核物理、粒子物理的研究。

中子发现的过程大致可分为两个阶段:第一阶段是关于原子核中存在中性粒子假说的提出和探索性的实验研究;第二阶段是与中子发现直接有关的工作。

1920年美国化学家哈金斯(W.D.Harkins,1873—1951)就提出了中子存在的设想,但这仅仅是一种假说而已。实际上卢瑟福提出存在中子的假设是以实验为依据的。当时曾试图使强电流通过氢放电管来探测这种假设的"中子"的生成,均未获成功。

1930年,德国科学家波特(Walther Welhelm Georg Bothe,1891—1957)和贝克(H.Becker)用α粒子轰击较轻的元素,特别是轰击铍时,发现从铍中发射出一种贯穿力很强的中性辐射。这两位物理学家认为,这是一种高能电磁辐射,即"高能γ量

子”,这些 γ 辐射的能量几乎是入射的 α 射线能量的 10 倍。

波特和贝克的工作引起了许多物理学家的兴趣,许多人都在自己的实验室中重复他们的实验。其中约里奥·居里夫妇(Frederic Joliot Curie, 1900—1958, Irene Joliot Curie, 1897—1956)所做的卓越的实验,可认为是中子发现史上的一个转折点。1931 年,他们进一步用来自铍的新射线去轰击石蜡。发现这种从铍放射出的新射线能从石蜡中打出强质子束来。1932 年 1 月 11 日,他们向巴黎科学院报告了这一结果。约里奥·居里夫妇把这一现象解释为 γ 光子同质子的康普顿散射。但是,非常明显的是,这种散射比当时已知的任何类似的散射所产生的作用要强 100 万倍,但他们并没有深入探求这个现象的解释,因而错过了发现中子的机会。

1932 年 1 月底,约里奥·居里夫妇的论文传到了卡文迪什实验室,查德威克把论文的内容告诉了卢瑟福。据说,卢瑟福听了他们提出的这种解释时大声喊道:“我不相信。”查德威克也不相信这种解释。他经过一番思考随即认识到:反冲质子有这样大的能量绝不可能是光子碰撞的结果,而很可能就是 10 年前卢瑟福所预言的中性粒子碰撞所致。查德威克用如图 10.1 所示的装置对这种新射线的性质进行了深入的研究。他用钋加铍作为源,使用这种新射线去轰击氢、氦、氮等元素。他通过比较这些反冲进而估算出这种射线的粒子的质量与质子的质量近乎相

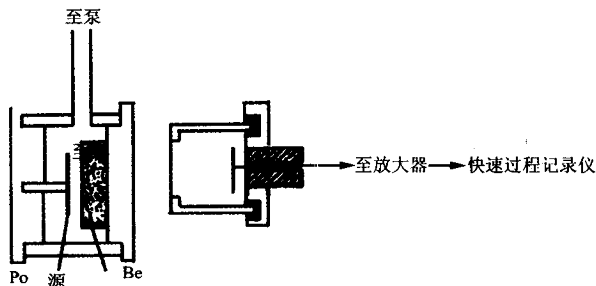


图 10.1 查德威克发现中子的装置简图

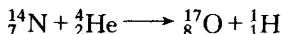
等。他把这种射线的粒子称为中子，于 1932 年 2 月 17 日写信给《自然》杂志，并于 2 月 27 日以题为“中子存在的可能性”的论文发表了他的研究结果。

中子的发现使人们对原子核结构有了新的认识，1932 年苏联科学家伊凡宁科就提出了原子核是仅由中子和质子所构成、不含电子的观点，海森伯也提出核内只含有质子和中子，并进一步计算了核的有关参数，如原子核质量、电荷、自旋、磁矩、统计规律等，这样原子核构成的理论就由质子-电子理论进步到质子-中子理论了。

进而，人们又对原子核的模型作了研究，但至今尚未有一个统一的为人们一致公认的结构模型，往往是一个模型在解释某一性质时比较成功，但在其他方面又遇到了困难。目前，这些模型中比较重要的有：液滴模型、α 粒子模型、费米气体模型、壳层模型、单粒子壳模型、多粒子壳模型、集体运动模型以及把集体运动模型和壳层模型统一起来的统一模型等。

目前对于原子核的微观机理还不很清楚，对于原子核的内部结构及其运动规律仍然是人们正在进行探索的一个重要课题。

在研究原子核内部结构中，开始人们都是利用天然放射性物质释放出的射线去轰击其他原子核的。1919 年卢瑟福曾用 α 粒子轰击氮原子，发现氮原子被轰击后释放出了质子，其过程是：



$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

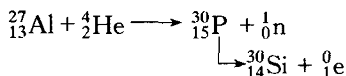
这个实验的成功是人类有史以来首次通过有意识的行为改变原子核，但若用 α 粒子去轰击重元素原子核时，却不会产生上述现象。这表明，由于整个原子核是带正电的，天然放射的 α 粒子要接近并击中重元素原子核是困难的。这样，实验又从另一方面启示人们必须用质子通过电场或磁场加速，使之具有足够大的能量才行。1929 年卢瑟福的学生科克洛夫特和沃尔顿建成了第一台 60～80 万伏静电加速器，并成功地用加速了的质子去轰击锂。他们因此而获得 1951 年度的诺贝尔物理学奖。

1930 年，劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence, 1901—1958)设

计制造了第一台回旋加速器后，1932年，做出了用回旋加速器加速粒子实现人工反应的第一个报导。自那以后，世界各地的许多实验室都在设计和建造回旋加速器。

回旋加速器为核研究提供了强有力的手段和方法，使核物理学得到了蓬勃的发展。劳伦斯由于发明回旋加速器和有关人工放射性方面研究的成果而获得了1939年诺贝尔物理学奖。

在用天然放射的α粒子轰击的工作中，一个值得提出的结果，引起了人们的重视。1934年约里奥·居里夫妇用钋源放射出的α粒子轰击铝，发现轰击后的铝有正β射线放出，并持续几分钟，其反应是：



$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$
$$^{30}_{15}P \longrightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{1}e$$

磷的同位素半衰期约有3分钟(min)，这种同位素不是天然同位素，因此，这就得出了可利用α粒子轰击出人工同位素，这是历史上的首次发现。而且它又是人工放射性的发现，是人工实现核反应的一大重要突破。约里奥·居里夫妇为此获得1935年的诺贝尔化学奖。这时，人们在想，能否使重元素也能发生分裂呢？

1934年，费米在他的同事阿达第(Eduardo Amaldi)、达高斯蒂诺(Oscar d'Agostino)、拉瑟蒂(Franeo Rasetti)、赛格雷(Emilis Segre)等人的帮助下，在设备极其简陋的条件下，用中子对周期表中的元素逐个地进行轰击，进行系统的研究。开始时，用中子对从氢到氧进行轰击，都没有成功，但到氟时，则获得了强烈的放射性同位素。在短短的几个月后，他们用中子轰击第92号元素铀，发现它产生的放射性元素不是一种，而且至少有一种是当时元素表中没有的元素(超铀元素)，当时，费米把这种第93和第94号元素称为Neptunium和Plutonium(即现在的镎和钚)。

1934年10月，费米和他的同事在研究银的人工放射性现象的实验时发现，透过石蜡块的中子在产生核反应方面的效果要比直接从中子源出来的中子有效得多，甚至要增大到100倍。费米认为，这是由于石蜡含有大量氢，中子通过石蜡时与氢核碰

撞失去了一部分能量，其速度减小变为慢中子，这种慢中子经过原子核附近的时间延长了，因而它被俘获的机会自然就增大了。费米的这一发现不仅使人工放射性物质代替价格昂贵的天然放射性物质成为可能，更重要的是它为核能的释放和利用提供了必要的手段。

在费米宣布发现超铀元素的同时，哈恩和迈特纳也在研究用中子轰击铀的产物。他们从玻尔提出的原子核的液滴模型出发，与细胞分裂进行类比，设想铀原子可能进行了一种核分裂，钡与其他的元素正是铀分裂后的产物。1939 年 2 月，他们在《自然》杂志上发表了题为“中子引起的铀分裂：新型核反应”的论文，在这篇文章中，他们写道：“……因此，看来有这种可能性，铀核只有小的结构和稳定性，因而在俘获中子后，它自身可能分成大致相等的两个核。以核的半径和电荷计算，这两个核将相互排斥，并获得 200MeV（1MeV = 100 万电子伏）的总动能。”“分裂之后……可能每一部分都会出现一系列蜕变。如果其中一部分是钡的同位素，那另一部分就会是氪（$Z = 92 - 56 = 36$），它经过铷、锶、钇而衰变成锆。”在这里，他们对铀核分裂的物理图像、分裂机制、分裂产物等都给出了明确的分析，同时，还指出了进行实验验证的方法。

1939 年初，费米得知了发现核裂变的消息，立即全力投入了铀的研究；还有约里奥·居里夫妇和西拉德等人都分别独立地证实了链式反应不仅可能，而且速率很高。这表明，铀核裂变的链式反应一旦实现，极短时间内将有巨大的能量释放出来。

这就是费米用中子轰击原子核取得成果的重大意义，他也因此获得 1938 年诺贝尔物理奖。

E. 费米 1901 年 9 月 29 日生于意大利的罗马。1918 年得到了比萨高等师范学院的助学金，于 1922 年以一篇有关伦琴射线的论文取得博士学位。

1923 年，费米获得了政府的奖学金，出国考察。他在哥廷

根与M.玻恩教授一起工作了几个月。1924年,他到了莱顿与埃伦菲斯特一起工作,同年返回意大利,在佛罗伦萨大学主持数学物理和力学讲座两年。1927～1938年,费米被选为罗马大学理论物理学教授。1938年,费米因发现慢中子和用中子轰击原子核产生人工放射性而获得诺贝尔物理学奖。费米和他的助手们在核物理学研究方面的一系列重大成就,使罗马一度成为世界的物理学中心之一。由于墨索里尼的迫害,费米一家不得不在1938年利用到瑞典领取诺贝尔奖金的机会迁居美国,1944年成为美国公民,1954年11月28日于芝加哥逝世。

1938年,费米无疑已是中子方面的最高权威。他到美国后,继续在这方面进行研究,为原子反应堆和首次受控链式反应进行了一系列极为重要的实验,为建造世界上第一座原子反应堆和第一个原子弹作出了重要贡献。

费米是20世纪杰出的物理学家,他在理论物理学、实验物理学方面都有很多建树。曾有人评价说:随着专业化的不断增长,我们要再次看到像费米这样的多才多艺的杰出人物的几率是很小的。

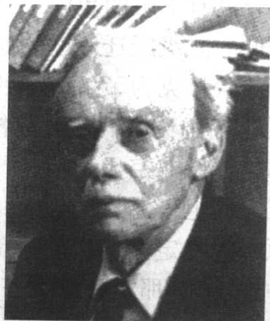
除了重核裂变外,轻核聚变也是获得核能的一种方法。但是要使轻核聚变必须使聚变物质具有足够大的能量才可能进行,这种在高温下的轻核聚变反应也叫做热核反应,用人工方法进行的热核反应是人工热核反应。氢弹就是利用人工方法的热核反应而产生爆炸。

10.2 “基本”粒子的性质及其规律

从1897年汤姆孙发现电子以来,到1932年已发现的粒子有电子、质子、光子、中子等4种,当时认为电子、质子等已是物质世界最小的“基元”,不可再分了,因而,将它们称为“基本粒子”。后来,进一步又把在当时的认识水平下,和上述粒子可以产生同层次转换的粒子,也称为“基本粒子”,而事实上,这些基

本粒子又被发现是有其内部结构的，因此，现在已改称为“粒子”而把“基本”二字去掉了，为此本节的标题的基本二字上加上了引号。下面我们介绍一下其他粒子的发现过程。这当中首先被发现的是正电子，正电子是由狄拉克在理论上作出预言，然后由安德森从实验证实的。

狄拉克于 1902 年 8 月 8 日出生于英国的布里斯托尔。他曾在布里斯托尔的商业中学读书，以后进入布里斯托尔大学攻读了电气工程，1921 年获电气工程理学学士学位。毕业后又在布里斯托尔大学学了两年数学，此后考入剑桥大学圣约翰学院研究生院攻读数学，于 1926 年获哲学博士学位。1930 年，年仅 28 岁的狄拉克就成了英国皇家学会的成员，1932 年被任命为剑桥大学卢卡斯（Lucasian）讲座数学教授，一直任职到 1969 年成为荣誉退休教授。1971 年后就任美国佛罗里达州立大学物理学教授。



P.A.M. 狄拉克
(1902—1984)

狄拉克是世界著名的数学物理学家。他的研究工作主要是量子力学的数学和理论两个方面，他最重要的成果是他建立的著名的波动方程。他因于 1928 年建立了相对性电子理论而获得了 1933 年诺贝尔物理奖。

到 20 世纪 20 年代末期，量子力学已经建立，用它来研究和处理微观粒子的低速运动的问题取得了很大的成功；同时，爱因斯坦建立的相对论，虽然能够讨论粒子的高速运动，但在处理微观粒子的波粒二象性上却无能为力。1928 年，狄拉克从相对论和量子力学的一般原理出发，建立了一个“相对论性”的电子运动方程——现在人们把它叫做狄拉克方程。利用这个方程来讨论氢原子的能量分布，电子的自旋、磁矩，以及讨论高速运动电

子的许多性质都与实验结果符合得很好。

但是，狄拉克理论本身却存在着一个严重的问题。因为他的方程有两个解，一个解中，粒子的总能量是正的；另一个解中粒子的总能量却是负的，而且存在无穷多的负能级，并且正能态和负能态的分布是完全相对称的。根据量子力学原理，如果存在着没有下限的负能级，那么一个正常的原子就可以无限地向更低的能级跃迁，这样，原子的稳定性就成了问题。

狄拉克为了解决他的方程中的负能态解，根据泡利不相容原理，于1930年提出著名的空穴理论。他假定，自然界的所谓"真空"并非空无一物，所有的负能态都被电子填满了，形成了负能态的电子海；正能态的电子不可能再往下跃迁，这样就保证了原子的稳定性。当处于负能态的电子受到激发由负能级"海洋"中逸出时，那里就留下一个空穴，这个空穴就相当于一个带正电的粒子。从对称性考虑，这种带正电荷的粒子应当与电子具有相同的质量。可是，由于当时所知道的带一个正电荷的粒子只有质子，于是，狄拉克假设："在电子的分布中，具有负能量的空穴就是质子。当具有正能量的电子落入空穴并填满它时，我们应当观察到电子和质子将同时消失，并伴随着辐射的释放。"狄拉克关于质子是电子的反粒子的假设提出后，立即遭到了奥本海默(J. R. Oppenheimer, 1904—1967)的批评。他指出，如果质子是电子的反粒子，氢原子就不可能是稳定的。1931年5月，狄拉克改变了原来的看法，提出空穴是一种"实验物理还不知道的新粒子，它们与电子的质量相同，电荷相反"，即预言了"正电子"的存在(参见图10.2)。

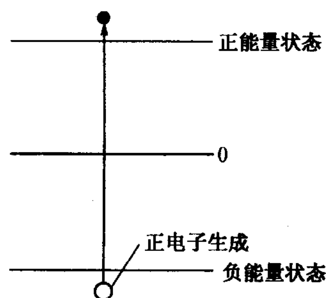
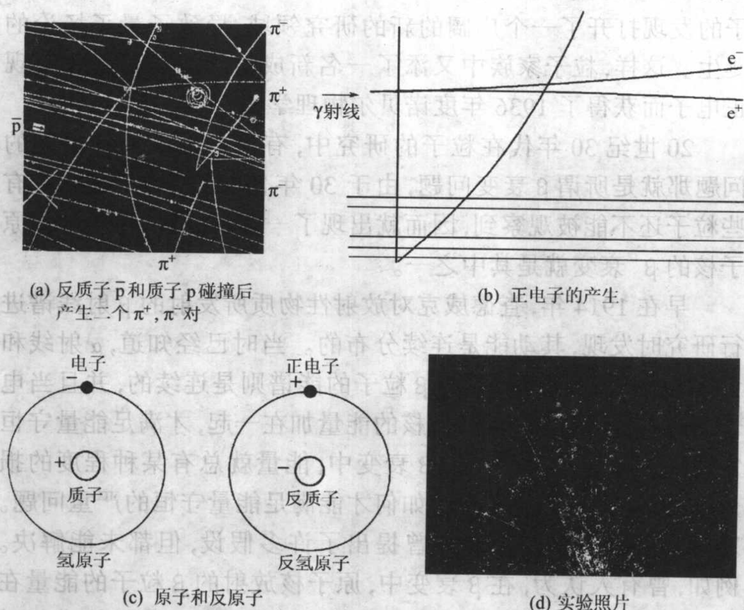


图10.2　狄拉克对正电子存在的预言

1932年8月2日，安德森(Carl David Anderson)在宇宙射

线的实验中证实了狄拉克的预言，发现了正电子（参见图10.3）。关于这一重要发现的情况，他在《物理评论》上发表的文章中写道："1932 年 8 月 2 日，对在垂直方向上的威尔孙云室（磁场强度为 1500 高斯①，云室是由密立根教授和作者于 1930 年夏天建成的）中的宇宙射线径迹照相时，发现了一些径迹。我们觉得，这些径迹只能用存着某种粒子来解释，这种粒子具有正电荷，它的质量相当于自由的负电子通常具有的质量。"据说，他当时并不知道狄拉克的预言，后来，当他知道狄拉克的理论预言后，他断定他观察到的正是狄拉克预言的那种带正电的电子，他便将它命名为正电子。



(a) 反质子 $\bar{p}$ 和质子 p 碰撞后产生三个 π^+, π^- 对

(b) 正电子的产生

(c) 原子和反原子

(d) 实验照片

图 10.3　反粒子和宇宙射线实验

其实，在安德森之前，在云室的照片中就曾留下了正电子的踪迹。例如，约里奥·居里夫妇在研究钋轰击铍产生的辐射时，

① 1 高斯 $=10^{-4}$特斯拉。

就曾在云室中看到了正电子的踪迹，但是他们却把这认为是一个反方向运动的电子所致。安德森在云室中加了一块 6mm 厚的铅板，使粒子通过它的速度减慢了，他根据粒子在磁场中的偏转方向、磁场方向和径迹在铅板两边的曲率半径的大小相等，对这种粒子的性质作出了正确的判断。

安德森的发现使狄拉克的空穴理论得到了证实。狄拉克的空穴理论给出了反粒子的概念。后来的事实证明，一切粒子都有与之相对应的反粒子，这是一个普遍的规律。在粒子物理中，现已不再采用狄拉克的空穴理论来认识正反粒子之间的关系，而是从正反粒子完全对称的场论的观点来进行处理，所以，正电子的发现打开了一个广阔的新的研究领域，导致了量子场论的诞生。这样，粒子家族中又添了一名新成员。安德森由于发现正电子而获得了 1936 年度诺贝尔物理学奖。

20 世纪 30 年代在粒子的研究中，有一个困扰科学家们的问题那就是所谓 β 衰变问题，由于 30 年代实验条件的限制，有些粒子还不能被观察到，因而就出现了一些难以解释的矛盾，原子核的 β^+ 衰变就是其中之一。

早在 1914 年，查德威克对放射性物质所发射的 β 射线谱进行研究时发现，其动能是连续分布的。当时已经知道，α 射线和 γ 射线能谱都是分裂的，而 β 粒子的能谱则是连续的，并且当电子能量取最大值时，与末态核的能量加在一起，才满足能量守恒定律。这样，一般说来，在 β 衰变中，能量就总有某种程度的损失，这就产生了在 β 衰变中如何才能满足能量守恒的严重问题。对这个问题不少物理学家曾提出了许多假设，但都未能解决。例如，曾有人认为，在 β 衰变中，原子核放射的 β 粒子的能量在开始时都等于连续能谱中的极大值，但在 β 粒子放射的进行过程中，由于它们与放射源本身或周围介质的轨道电子的相互作用，一部分能量损失掉了，有的 β 粒子的能量损失较多，有的少些，这样 β 粒子能谱就成了连续分布了。不过，这种解释很快就被实验事实所否定。玻尔为解决这个问题曾认为，能量守恒定律只是在总体上成立，即在大量事件的统计平均的意义上保持

宏观上的守恒，而在每一个微观事件中，例如在β衰变中，能量守恒不再成立。

1930年，泡利提出了与玻尔相反的看法。他从β衰变中可观察的能量总是不足而不会是“盈余”的事实出发，认为这明显地不能作统计平均来解释。于是，他假定，原子核在β衰变中除了放出电子外，还放出其他一些粒子将一部分能量带走了。泡利把这种粒子描述成是一种没有电荷、自旋为 $h/2$ 的中性粒子，这样就既能保持能量守恒，又满足了自旋的要求。



W. 泡利(1900—1958)

这里值得注意的是，泡利预示着一种新粒子存在的可能性。费米紧紧抓住了这一新的想法，他把泡利讲的中性粒子定名为“中微子”并很快建立起相应的β衰变理论。

在一般的理论中，粒子数是守恒的，质子、中子等既然都是基本粒子，那就不可能再分了。那么β衰变放出的这些粒子是怎样产生的呢？费米大胆地突破了粒子数守恒的框框，他认为β衰变中放出的电子和中微子都是瞬间发射而产生的，就像电子在能级上跃迁产生光子一样，在β衰变的过程中是原子核中质子和中子的相互转换变化，这个过程也可以看成是核子在不同的量子态间跃迁的产物，即

$$n \to p + e + \bar{\nu}\ (\beta^- \text{衰变}),\quad p \to n + e^+ + \nu\ (\beta^+ \text{衰变})$$

n是中子，p是质子，e是电子，$\bar{\nu}$是反中微子，e^+是正电子，ν是中微子，这两种衰变只能发生在核内。

在费米的理论中，假设了一种完全新型的力，即所谓弱相互作用。这种新型的力跟引力、电磁力和强相互作用力(核中核子之间的力)一起组成了我们现在所说的四种相互作用力。

中微子由于没有电荷，它只参与弱相互作用，因而穿透本领

极强，所以实验上很难发现它的存在。直到1955年美国洛斯阿拉莫斯实验室的雷乃斯(Frederic Reines)和考万(Clyde Lorrain Cowan)用高功率反应堆产生的反中微子源进行实验，才证实了中微子的存在。1962年以后，又发现了另一种中微子 ν_μ 及其反粒子 $\bar{\nu}_\mu$。现在一般认为，中微子有这样三类：ν_e, ν_μ, ν_τ。

在研究原子核性质的过程中，人们逐渐弄清了原子核内部核子间的核力具有的特征。核力是一种短程力，核力的作用半径接近于 1.5×10^{-15} m，在这个范围内其强度量级相同，超过这个范围，其强度迅速减弱到可以忽略；核力是一种强相互作用力，原子核内的质子间尽管存在着强大的静电斥力，而其个别粒子仍以700万电子伏(7MeV)数量级的能量相结合，这样把核子结合在一起的力显然不能归结为电磁作用力或引力的某种表现。那么，这是一种什么样的力呢？

海森伯和费米都曾企图用类似于两个带电粒子间的相互作用是由于相互发射及吸收光子的方法来解决核力问题。海森伯认为，核力是核子间交换一种服从玻色-爱因斯坦统计法的无自旋电子产生的；费米也曾提出，中子和质子是通过相互发射和吸收电子和中微子而发生相互作用的。1934年，塔姆(Jgor Yervgenievich Tamm, 1895—1971)在《中子与质子间的交换力》的论文中，进一步对核子间交换电子和中微子产生的相互作用进行计算后指出，这样产生的力远比核力强度小(要小 10^{10} 倍)。

1934年10月，日本物理学家汤川秀树提出了核力的介子理论，解决了核力难题。

汤川秀树(Hidiki Yukawa, 1907—1981)于1907年1月23日出生于日本首都东京。他在小学高年级时就对数学有浓厚的兴趣。在高中时，他曾读过普朗克的《理论物理引论》，普朗克的思想使他着了迷，这对他后来选择理论物理学作为他的研究方向有一定的影响。他在京都大学理学院学习时，曾听过长岗半太郎教授所作的“今昔物理学”的演讲，这使他对1900年以来物理学的发展有了全面的了解，他在1929年取得硕士学位，1938

年获博士学位。

汤川秀树和他同时代的日本科学家朝永振一郎(1900—1979)、坂田昌一(1911—1970)一起,通过努力,逐步形成了在世界上具有很大影响的一个理论物理学派。

汤川从核力和电磁力的类比,勇敢地提出了核力的介子理论。电子-电子的相互作用,是由一个电子放出的光子被另一电子所接收,这两个电子之间发生了库仑相互作用,由于这种光子并没有离开电子所以被称为"虚光子",在核子间一个中子和一个质子通过交换一个"虚粒子"而间接作用,这表示它们都是"交换力",即核力也是交换力,这种核力的作用随它们相互间距离变化而变化。汤川根据核力的相互作用距离约为 10^{-15} m 左右,估算出这种交换的虚粒子质量约为电子质量的 200 倍,即介于电子和质子之间,便称为"介子"。起初,除日本国内外,其他国家的反应冷漠。可是,就在这一年安德森从宇宙线中发现了一种质量为电子质量 207 倍的粒子,人们以为它就是汤川预言的介子了,可是继续研究发现它同核子的作用极弱,比电磁作用还弱 10^{11}倍,因此不可能是传递核力的介子,后来搞清楚了这个粒子的性质,它就是 μ 介子,那么汤川介子是什么呢?直到 1947 年,英国的鲍威尔由高空气球的乳胶上的探测才发现这是一种互为正反粒子,平均寿命只有 2.6×10^{-8}s,并且 100% 衰变为 μ 介子的一种 π 子,叫做 π 介子,它的质量是电子的 273 倍,所以有人戏言,当年是先找到了"儿子",后来才找到"老子",而在 $\pi\rightarrow\mu$ 的变化中也有放出中微子的现象。以上讲的是 π^+ 和 π^-,后来发现还有不带电的 π^0,不过它的寿命更短,只有 0.84×10^{-16}s。

到 1947 年发现 π 介子时为止,人们认识到的粒子已达 14 种之多:光子(γ)、电子(e^-,e^+)、中微子(ν,$\bar{\nu}$)、介子(μ^+,μ^-,π^+,π^0,π^-)、质子(p,$\bar{p}$)、中子(n,$\bar{n}$),其中中微子、反质子、反中子、π^0 介子是当时已被预言而尚未被实验所证实。就在这一年,罗切斯特(George Dixon Roechester)和巴特勒(Clifford

Charles Butler)在宇宙射线实验中首次得到了后来被称为奇异粒子的径迹照片，这就是后来被称为 K^0 和 K^- 的介子。

1950 年前后实验中发现了一大批新的粒子，如 K^+、K^0、K^-、$\overline{K}_0$、Λ、Σ^+、Σ^0、Σ^-、Ξ^0、Ξ^+ 等。这些粒子具有两个明显的特点：

第一是这些粒子总是协同产生，非协同衰变，而且是通过强相互作用产生，通过弱相互作用而衰变；其次是这些粒子产生时非常迅速，而衰变过程却是很缓慢。

正是由于这些粒子具有上述两个"奇异"特性，当时的理论无法加以解释，所以它们被称为奇异粒子。

1953 年，盖尔曼(Murray Gellmann)等人为了解释奇异粒子的有关实验规律，引入了一个新的量子数 S(奇异数)，并假定，在强相互作用下有关粒子的奇异数之和严格守恒。奇异数 S 的引入很好地解释了奇异粒子的特性，在强相互作用过程中奇异数守恒，在弱相互作用过程中奇异数可以不守恒。

粒子的性质，除了质量、电荷、自旋以及半衰期等外，还有一种"宇称性"。宇称的概念是拉柏特(O. Laporte)在 1924 年分析分子光谱时最先提出并总结成为宇称守恒定律；1927 年，威格纳(Eugene Paul Winger)证明了在原子现象中宇称守恒。以后又进一步推广到原子核物理和粒子物理中，直到 1954 年左右，实验表明，宇称守恒定律是有效的。

1954～1956 年间，人们在观察当时称为 θ 和 τ 粒子的某些 K 粒子的衰变现象时，发现了一个疑问，即"θ-τ 疑难"。精确的实验证明，θ 与 τ 这两种奇异的粒子的质量、电荷、自旋、半衰期等都相同，它们似乎应是相同的粒子；可是它们的衰变方式却不同：θ 衰变为两个 π 介子，τ 衰变为三个 π 介子。即

$$\tau^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{\pm} + \pi^{\mp}$$

$$\theta^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{0}$$

对实验结果的分析表明，3 个 π 介子的总角动量为零，宇称为负；而两个 π 介子的总角动量如果为零，则宇称为正。因此，如

果确认宇称守恒定律严格成立,那么 τ 与 θ 就不可能是同一种粒子;而如果认为 τ 与 θ 是同一种粒子,宇称守恒定律就不成立。

值得注意的是,当时所有关于衰变的理论都是建立在宇称守恒的基础上的,这些理论与实验符合得相当好。因此,一般人都认为宇称守恒定律是无需怀疑的。但当时已有的理论对此却又无法作出圆满的解释。

就在这种情况下,旅美中国科学家杨振宁和李政道经过仔细的分析研究,对宇称守恒定律在弱相互作用过程中是否成立的问题提出了质疑。他们指出:"在检查了当时已存在的关于这个概念(指宇称概念——编者)的实验基础以后,得到下述结论:和一般所确信的相反,在弱相互作用中实际上并不存在左右对称的任何实验证据。如果左右对称在弱相互作用中并不成立,则宇称的概念就不能应用于 θ 和 τ 粒子的衰变机构中。因此 θ 和 τ 可以是同一种粒子。"

1956 年 9 月,杨振宁在一次国际理论会议上所作的关于"目前对新粒子的了解"的演讲中报告了他和李政道共同研究的结果,并提出了用实验来验证的方案。几个月之后,在哥伦比亚大学工作的中国物理学家吴健雄与美国的几位物理学家一起,用钴 60 的衰变实验证实:在这种 β 衰变的过程中宇称确实不守恒。

弱相互作用下宇称不守恒的发现,进一步激发了人们对微观世界奥秘的探索。

杨振宁、李政道由于发现在弱相互作用中宇称不守恒而共同获得了 1957 年度诺贝尔物理学奖。

著名的原子物理和原子核物理学家,诺贝尔奖获得者 E. 赛格雷在《从 X 射线到夸克》一书中,在谈到杨振宁、李政道、吴健雄三位物理学家的贡献时评论说:"从当代这三位中国物理学家所取得的成就,也可以看出中国这个伟大的国家在度过当前的革命震动时期,并恢复其作为世界文明发源国之一的作用后,将

来可能对物理学作出什么样的贡献。"

这些被称为基本粒子的粒子的结构怎样呢？它们是否是由更基本的粒子组成的呢？1964年，盖尔曼进一步提出"夸克模型"，他认为，所有已知的基本粒子，都是由三种更为基本的"夸克"(quark)粒子所组成的。这就是现在习惯被记为u、l、s的三种"夸克"。

1974年，美籍华裔科学家丁肇中和他领导下的小组，在美国纽约州长岛的布鲁克海文国立实验室发现了一种前所未知的新粒子，他命名为J粒子；差不多同时，美国的利希特(Burton Richter)等人也发现了一种新粒子，命名为ψ粒子。这两种粒子实际是同一种粒子，现称J/ψ粒子。丁肇中和利希特因发现J/ψ粒子而共同获得了1976年度诺贝尔物理学奖。

J/ψ粒子有着非常独特的特性，它质量很大(质子的三倍多，寿命很长，$1\sim10^{-20}$s)，由理论和实验的研究得出，这种粒子是由一种新的夸克c及其反粒子$\bar{c}$构成的，c称为粲夸克，后来又发现了底夸克b，顶夸克t。表10.1是夸克的种类及其量子数。

表10.1　夸克的种类及其量子数

名称	符号	自旋J	电荷(以e为单位)	重子数B	同位旋第三分量I_3	c量子数	s量子数	t量子数	b量子数
上夸克	u	1/2	2/3	1/3	1/2	0	0	0	0
下夸克	d	1/2	−1/3	1/3	−1/2	0	0	0	0
粲夸克	c	1/2	2/3	1/3	0	1	0	0	0
奇夸克	s	1/2	−1/3	1/3	0	0	−1	0	0
顶夸克	t	1/2	2/3	1/3	0	0	0	1	0
底夸克	b	1/2	−1/3	1/3	0	0	0	0	−1

表中的六种夸克通常称为六"味"，而每"味"的夸克又有三"色"，即红、黄、蓝(也有称红、黄、绿或红、绿、蓝的)三色。这样，夸克有六"味"、三"色"，加上它们的反粒子共有36种。

按静止质量大小，基本粒子被分为：光子、轻子、介子、重子四大类，其基本分类表如表10.2所示。

表 10.2 基本粒子分类表(稳定及亚稳定粒子)*

分类		符号	电荷(e)	自旋(h)	质量/MeV	寿命/s	轻子荷	重子荷	同位旋	奇异数	反粒子
光子类		γ	0	1	$0(<2.10^{-21})$	∞	0	0			γ
轻子类		ν_e	0	$\frac{1}{2}$	$0(<60\text{eV})$	∞	1	0			$\overline{\nu}_e$
		ν_μ	0	$\frac{1}{2}$	$0(<0.57\text{eV})$	∞	1	0			$\overline{\nu}_\mu$
		ν_τ	0	$\frac{1}{2}$	$0(<250)$	∞	1	0			$\overline{\nu}_\tau$
		e^-	-1	$\frac{1}{2}$	$0(<250)$	∞	1	0			e^+
		μ^-	-1	$\frac{1}{2}$	105	2.19×10^{-6}	1	0			μ^+
		τ^-	-1	$\frac{1}{2}$	1784	$<2.3\times10^{-12}$	1	0			τ^+
强子类	介子	π^+	$+1$	0	139	2.6×10^{-8}	0	1	1	0	π^-
		π^0	0	0	134	0.82×10^{-16}	0	1	1	0	π^0
		η^0	0	0	548	7.7×10^{-19}	0	1	0	0	η^0
		K^+	$+1$	0	493	1.23×10^{-3}	0	1	$\frac{1}{2}$	$+1$	K^-
		K^0	0	0	497	$K_L 5.18\times10^{-8}$ $K_S 0.89\times10^{-10}$	0	1	$\frac{1}{2}$ +1		K^0
	重子	p	$+1$	$\frac{1}{2}$	938	$10^{31}\sim10^{34}$	0	1	$\frac{1}{2}$	0	$\bar{p}$
		n	0	$\frac{1}{2}$	939	0.92×10^{3}	0	1	$\frac{1}{2}$	0	$\bar{n}$
		Λ	0	$\frac{1}{2}$	1115	2.63×10^{-10}	0	1	0	-1	$\overline{\Lambda^0}$
		Σ^+	$+1$	$\frac{1}{2}$	1189	0.89×10^{-10}	0	1	1	-1	$\overline{\Sigma^-}$
		Σ^0	0	$\frac{1}{2}$	1192	5.8×10^{-20}	0	1	1	-1	$\overline{\Sigma^0}$
		Σ^-	-1	$\frac{1}{2}$	1197	1.48×10^{-10}	0	1	1	-1	$\overline{\Sigma^+}$
		Ξ^0	0	$\frac{1}{2}$	1314	2.9×10^{-10}	0	1	$\frac{1}{2}$	-2	Ξ^0
		Ξ^-	-1	$\frac{1}{2}$	1321	1.64×10^{-10}	0	1	$\frac{1}{2}$	-2	Ξ^+
		Ω^-	-1	$\frac{1}{2}$	1672	0.82×10^{-10}	0	1	0	-3	$\overline{\Omega^+}$
	带粲介子	D^0	0	0	1864	4.3×10^{-13}	0	1	$\frac{1}{2}$	0	$\overline{D^0}$
		D^-	-1	0	1869	9.2×10^{-13}	0	1	$\frac{1}{2}$	0	D^+

* 近年发现的一些新粒子，在表中没有全部列出。

如物质结构的其他层次一样，相互作用是事物的真正的“究极原因”。因此，研究基本粒子之间的相互作用的性质，探索基本粒子内部相互作用的特征，是认识物质结构在基本粒子层次的最重要任务之一。

基本粒子之间的相互作用与物质结构的原子、分子、宏观物体……层次相比，具有更深刻、更丰富的内容。首先，在这一层次里完全排斥了超距作用观点，基本粒子之间的相互作用是通过不断地吸收与发射场的量子而进行的。其次，相互作用的类型，除我们已熟知的引力相互作用及电磁相互作用外，尚有两种新的相互作用类型——弱相互作用及强相互作用出现。下面我们分别阐述之。

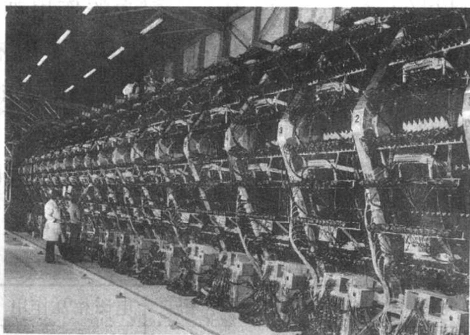
电磁相互作用

带电的粒子，或不带电但带有磁矩的粒子都能与电磁场直接发生作用，或者以电磁场为媒介彼此发生作用。这种有电磁场参与的相互作用，称为电磁相互作用。电磁相互作用是通过交换电磁场的量子——光子而发生的，电磁相互作用的耦合常数 $\alpha=\frac{e^2}{hc}=\frac{1}{137}$，因为它最早出现在索末菲 1916 年所发现的氢原子的精细结构之中，所以 α 亦称为精细结构常数。电磁相互作用是一种长程相互作用（作用半径 $r\to\infty$），其作用特征时间为 $10^{-20}\sim10^{-16}$ s 的数量级。电磁相互作用是一种非常普遍的相互作用，光子、轻子、介子、质子均参与这种相互作用。

强相互作用

人们因研究核力（1935 年）而发现了强相互作用，由于核力比早已熟悉的电磁力强得多，故称强相互作用。这种强相互作用是通过交换胶子场的量子——胶子而发生的，强相互作用的耦合常数约等于 1。强相互作用是一种短程相互作用（作用半径 r：$10^{-14}\sim10^{-16}$m），其作用时间一般在 10^{-23}s 数量级。相对来说，强相互作用过程是非常迅速的。这种强相互作用只发生在介子及重子之间，光子及轻子不参与强相互作用。1962 年，

奥孔曾经引入强子一词，用它来代表参加强相互作用的粒子：介子及重子。



验证强相互作用的大型实验装置

弱相互作用

人们因研究核的β衰变(1934 年)而发现了弱相互作用。由于β衰变过程进行得异常缓慢，物质间的相互作用比电磁力弱得多，故称弱相互作用。这种弱相互作用是通过交换中间玻色子而进行的。弱相互作用之耦合常数约 10^{-15}，弱相互作用是一种更短程的相互作用(作用半径 $r<10^{-16}$m)，其作用时间则较长，也就是弱相互作用过程相对来说是非常缓慢的。重子、介子、轻子均参加弱相互作用，但只中微子是惟一不参加弱相互作用的粒子。

引力相互作用

引力相互作用是一种比弱相互作用更弱的相互作用。若强相互作用的强度为 1，则引力相互作用的强度约为 10^{-40}。因此，引力在基本粒子世界的效应一般是略而不计的，但引力的量子效应在更小的领域有可能表现出来。

引力是人们最早熟悉的一种相互作用，但也是本质隐藏得最深的(与上述三种相互作用相比)一种相互作用。对于引力的规律及本质的认识，在物理学史上经历了几个阶段：第一阶段是

牛顿总结的万有引力定律；第二阶段是爱因斯坦的引力场方程；第三阶段是引力场的量子化。按照引力场的量子化观点，引力场还存在着自己的量子——引力子。引力的作用被认为是通过交换引力子而发生的。到目前为止，这种引力子还未观察到。

由于各种相互作用，基本粒子将发生各种形式的相互转化。在已知的基本粒子中，没有一个不能作某种转化的，这是物质结构基本粒子层次的一个很突出的特征(图 10.4)。四种相互作用的基本特征列于表 10.3 中。

表 10.3　四种相互作用的基本特征

	引力相互作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
强度(以强相互作用强度为约等于 1)	$\approx 10^{-40}$	$\approx 10^{-15}$	$\frac{e^2}{hc}=\frac{1}{137}$	≈ 1
作用半径 r/m (作用力程)	$r \to \infty$	$<10^{-16}$	$r \to \infty$	$10^{-14} \sim 10^{-16}$
作用时间 t/s		10^{-8}	$10^{-20} \sim 10^{-16}$	10^{-23}
交换的场量子	引力子(?)	$W^{\pm}, Z^0$ 中间玻色子	光子	胶子，π
参加的粒子	静止质量不为零的粒子和一切物质间	轻子，介子，重子	光子及电荷或磁矩不为零的粒子，强子	介子，重子，胶子
遵守的守恒定律		质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷的守恒定律	质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷、奇异数、同位旋分量、宇称的守恒定律	质量、能量、动量、角动量、电荷、轻子荷、重子荷、奇异数、同位旋、同位旋分量、宇称的守恒定律
举例	天体间作用力	β 衰变	原子间结合力	核力

宇宙初期发生的事件是与以上四种基本作用相联系的，这可从图 10.5 中看出。

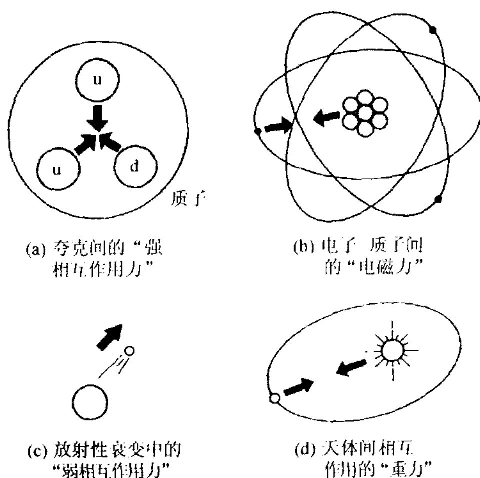


图 10.4 基本粒子间的相互作用

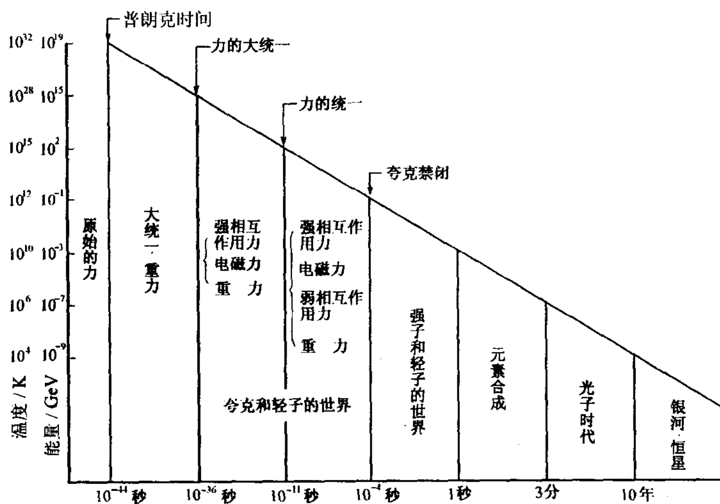


图 10.5 宇宙初期事件

学过本讲后，若我们再考虑讨论物质结构时，就会进一步深入了。这里举一个简单的例子：深层次了解水(图 10.6 所示)

时，应会发现物质在不同尺寸层次上的结构了。

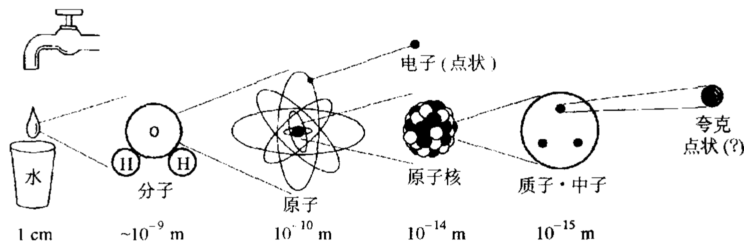


图 10.6　深层次地了解水

至此，细心的读者也许会提出，夸克、电子能否再分下去呢？对于夸克确也有人提出假设，它并非终极结构，但独立存在的夸克尚未被发现，即使在发现 J/ψ 粒子之后，对其深层次研究的问题仍未解决。那么，电子又是怎样的呢？这里介绍一个信息，美国布朗大学的汉弗莱·马里斯提出的某些想法，正对科学的正统观念产生重大的冲击。他认为，电子也可以被分裂——电子分成的碎片称为“电微子”。

早在 20 世纪 60～70 年代，汉弗莱·马里斯曾对电子作过深入的实验研究工作，他再次考察了在 60～70 年代期间他首次得到这个结论的实验。在这些实验中，电子被射到液氦上(液氦处于 -269℃，仅比绝对零度高了 4℃)。在液氦中的电子以一种令人费解的方式运动，对这一点如今没有一个完全令人满意的解释。它们产生出微小的、直径大约为 1mm 的百万分之四(相当于 400 个原子大小)的许多磁泡，氦无法进入这些磁泡内。当光照射到这些磁泡上的时候，就会出现新的“身份不明”的带负电的粒子。

使人不解的是，光并不是把电子从原子中“撞击”出来。事实上，对已经发生的这些现象我们至今尚未找到答案。然而马里斯认为，电子已经发生了分裂。他提出，光引起磁泡的振动直到它们像振动的水滴那样发生破裂为止。他说，在初始的磁泡内，电子的行为非常像一种波。当磁泡分裂时，每一块碎片获得

了一部分发与它们相伴随的电子波——“电中微子”。马里斯说，在液氦中发生这种行为是可能的，因为它的表现如同一种“超流”，在流动时不会出现任何的黏滞性。因此，导致破裂的磁泡振动不像它们在通常液体中那样会受到抑制。事实究竟怎样，这将会引起一场争论，有人评论说：对于光产生神秘带电粒子的更传统的解释现在还没有过时。

第十一讲　我国科学家在基础物理研究方面的介绍

20 世纪纪初，中国物理学家在物理学发展中所作的贡献为世人所瞩目，现介绍几位的简况。



吴有训(1897—1977)

吴有训

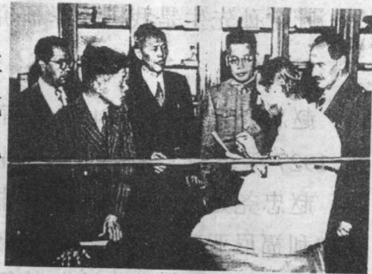
吴有训于 1897 年出生于江西高安县，1916 年考入南京鸡鸣山麓的南京高等师范学堂(即今东南大学四牌楼校址)，1912 年赴美留学，在芝加哥大学随康普顿从事 X 射线散射研究。从 1924 年以来，他测量了 X 射线被方解石晶体反射过程中的吸收情况，测量了被轻元素散射的钼 K 射线的波长；论述了康普顿效应与第三级 X 辐射(1925 年)；观测了由反冲电子产生的 X 射线的散射强度(1925 年)以及康普顿效应中变线与不变线的能量分布(1926 年)，证明了这两种线强度之比与散射角有关(1926 年)；论述了康普顿效应中可变线绝迹现象(1926 年)；检测了荧光 X 射线的 K 双重线的强度分布(1926 年)。

1926 年回国后，他在国内实验条件极差的情况下，仍继续进行 X 射线散射和吸收方面的研究。1928 年，他详细论证了康普顿效应中两种线之间的强度分配；1930 年，做实验研究了单原子气体对 X 射线的总散射。1931—1936 年间，他对 X 射线的散射作了更广泛深入的研究。例如论证单原子气体、双原子和多原子气体以及一般气体对 X 射线的总散射强度，各种晶体的漫散射及其与温度之间的关系。他一生发表论文 50 余篇，在实验物理学方面有极深的造诣，是我国近代物理学杰出的奠基人

之一。

1927年,康普顿被授予诺贝尔物理学奖,这其中吴有训的工作是不可忽略的。康普顿把吴有训的一张被15种元素所散射的X射线光谱图和他自己于1923年得到的石墨所散射的X射线光谱图并列作为当时证实其理论的主要依据。当1923年5月康普顿首次公布了他的有关X射线光谱的实验结果时,却遭到了异议,原因是著名实验物理学家、哈佛大学的布里奇曼教授竟没有能重复康普顿的结果。由于哈佛大学和布里奇曼本人的盛名,这一重大发现受到了怀疑。正是吴有训亲自赴哈佛,以精巧谙练的实验技术,在同行们面前演示了他们的结果,才使物理学界信服。难怪国外一些物理教科书将康普顿效应称为康普顿-吴有训效应,而吴有训对此总是谦逊地断然拒绝。1962年1月,杨振宁教授从国外赠给吴老一册自己所写的书,在扉页上题词说:"年前晤A. H. Compton教授,他问我师近况何如,并谓我师是他一生中最得意的学生。"当时康普顿已70高龄。

吴老从事教育工作50余年,非常关心我国的教育事业。张文裕教授著文称:"我与吴老曾多次谈起中国教育制度的弊病,中国是受科举制度漫长时代的影响,惟有读书高,考书本,重分数,一次考试定终身,动辄以'学富五车'相夸耀,却以'奇技淫巧'而不屑为。吴老曾说:'念书念书把人都念傻了。'他曾谈起过回旋加速器的发明者劳伦斯,他是吴老在芝加哥大学研究生院的同班同学,在研究生院时成绩只是一般,同学们也不重视他,但是他发明了回旋加速器,对核物理和高能物理研究起了划时代的作用。吴老认为单纯强调书本,强调分数是不利于培养科学人才的。"



吴有训(左三)、王淦昌(左二)和恽子强(左四)在波兰科学院参观(1951)



叶企孙(1898—1977)

叶企孙

叶企孙先生在物理学研究方面取得两项重要成就:

第一项是 1918～1923 年,他在美国留学时期,和杜安及帕耳合作测定普朗克常数 h。文章发表于 1921 年美国科学院院报和美国光学学会学报,普朗克常数最早测定值为 6.548×10^{-34} J·s,其后是 1916 年 D. L. Webeter 测定值;第三次为 1917 年 F. C. Black 测定值,第四次即叶企孙测定值($(6.556\pm0.009)\times10^{-34}$ J·s),这个值在以后十余年中为大家所采用。

第二项是流体静压对铁、镍、钴的磁导率的影响,这个工作是他在哈佛大学独立完成的,论文载于 1925 年美国艺术与科学学院学报。首先开始研究高压对铁、镍的磁化影响的是 19 世纪末的日本科学家。当时流体静压只达到 200 多个大气压,效果不佳。叶先生一面改进测量方法,一面使流体静压增加到 1.2 万个大气压,观察到前人所未见的复杂现象。对此他还做了理论分析,虽不能与实验数据定量符合,但得到了定性解释。

叶企孙先生是我国磁学研究的第一人。

赵忠尧

赵忠尧先生于 1924 年从南京高等师范学堂数理化学部毕业,1927 年东南大学化学系毕业,后赴美国加州理工学院留学。

赵忠尧是我国杰出的原子核物理学家。1929～1930 年,他在加利福尼亚理工学院研究硬 γ 射线在物质中的吸收和散射现象,和欧洲几位物理学工作者各自独立地发现硬 γ 射线在重元素中的反常吸收。为了探索这种反常吸收的机制,他进一步测量了被铅散射的硬 γ 射线。他发现伴随着反常吸收有一种特殊

的辐射放出，这种辐射中每个光子的能量约等于 550 keV，与相当于一个电子质量的能量 511 keV 很接近。由于当时所用的方法不能显示详细的机制，只能断定，这两种现象不是由于核外壳电子而是由于原子核所引起的。事实上反常吸收是由于 γ 射线在原子核周围产生正负电子对而减少的结果，而特殊辐射就是一个正电子和一个负电子相碰湮没而产生二个(或二个以上)光子的湮没辐射。这项实验表明，在正电子发现之前两年，赵忠尧已发现了后来人们才认识到的正负电子对的湮没辐射。



赵忠尧(1902—1998)

1932 年，安德森由在观察宇宙射线时发现了正电子的存在而获得 1936 年诺贝尔物理学奖。1981 年，安德森在回忆当时情况时说："隔壁房间的赵忠尧用验电器研究铅对钍 γ 射线的吸收和散射，他发现，铅对 γ 射线的吸收和散射都超过了莱因-仁科公式的预测值。"安德森对这件事很有兴趣，因而决定从事导致他发现正电子的研究工作。赵忠尧的研究使他堪称为正电子的发现者之先驱。

1932 年以后，赵忠尧继续从事 γ 射线与原子核相互作用的研究，他从中子共振吸收入手，探讨了原子核的能级间距，特别是计算了银、铑、溴的共振中子能级间距。1949—1950 年间他又研究了宇宙射线的簇射理论，探测了氟被质子轰击后蜕变所放射的低能 α 粒子和 α 射线的角分布，这些研究都丰富了原子核物理学的深刻内容。

1946~1948 年，赵忠尧出国参观美国在太平洋进行的原子弹试验，并在加州理工学院核反应实验室工作。1950 年回国途中因寄运核物理实验设备被美国驻日军方无理关押在日本东京的巢鸭监狱两个多月。回国后他所带的实验设备对我国核物理研究起了相当重要的作用。周培源教授称他是"中国核物理的

开山鼻祖”。

1979年夏天，西德DESY的PETRA正式运转，世界著名物理学家纷纷被邀请到汉堡参加这一庆祝活动，诺贝尔奖金获得者丁肇中把身材矮小、满头乌发的中国物理学家赵忠尧介绍给他的实验组，热情赞扬他在正电子发现时期所作的贡献。


周培源(1902—1993)

周培源

1902年周培源出生在江苏宜兴，1919年因参加“五四”运动被上海圣约翰大学附中开除，而后考入清华学堂作插班生，1924年赴美加州理工学院留学，1928年取得博士学位后仅用一年时间去德国莱比锡大学和瑞士苏黎士做博士后，1929年回国执教于清华大学，时年27岁，成为清华园最年轻的物理教授。由于周致力爱因斯坦相对论的研究，从博士论文起就坚持下去，所以1936年又再赴美普林斯顿高等学术研究所，在爱因斯坦直接领导下从事相对论、引力场、宇宙论的研究，他的70多年学术生涯中主要工作之一就是研究爱因斯坦广义相对论和引力论，他对弗里德曼宇宙理论的研究取得的成绩也为同行们所重视。

他热爱祖国、热爱科学，倾毕生精力为我国科技和教育事业辛勤工作，顽强奋斗，他胸怀坦荡，一身正气，情操高尚，他的杰出贡献和历史功绩将为后人世代传颂。

王淦昌

王淦昌，江苏常熟人，早在上中学时对科学就有浓厚兴趣，进入清华大学后更是在叶企孙等老一辈的熏陶和教导下，坚持几十年如一日以非常严谨的科学作风去探求。他以学习科学、科学获得进取为乐。在他1997年九十大寿时，还写下了“学习是享受”的五字诀激励年轻人奋发向上，不断前进。

王淦昌思想活跃，勇于探索，精于实验。早在查德威克发现

中子(1932 年)的前一年,他在德国柏林大学留学时,就提出用云雾室研究 α 粒子轰击铍原子核发现的射线的性质来验证中子的存在,可惜这个实验未能进行。1933 年,奥地利物理学家提出中微子的假设,长期未得实验的证明。王淦昌设想用观察轻原子 K 俘获过程中的核反冲方法来作实验,因战争环境不具备实验条件,他只好把设想的方案写成论文。这篇论文 1942 年发表在美国的《物理评论》杂志上,


王淦昌(1907—1998)

半年后,美国物理学家阿伦照这个方案进行实验,首次证实了中微子的存在。20 世纪 50 年代中期,美国物理学家相继发现了反质子、反中子。王淦昌预言在 100 亿电子伏质子同步稳相加速器上有可能找到反超子。他在苏联的杜布纳联合原子核研究所领导一个研究组,制造了一个大型丙烷气泡室,设计了一个精致的实验,终于在 1959 年找到了一个带有反西格玛负超子的事例,取得了国际上公认的重要研究成果,获我国自然科学一等奖。

王淦昌热爱祖国,一心为祖国的繁荣富强作出贡献。抗战开始后,他随学校迁至西南后方。为了支持抗战,他开设了一门《军用物理》的课程,自己编教材,自己讲授,受到学生的欢迎。新中国成立后,我国的科学事业获得新生。1950 年,成立近代物理研究所,王淦昌调到所里主持宇宙线研究。1960 年,由于赫鲁晓夫单方面撕毁合同,妄图把我国原子能事业扼杀在摇篮里,当时任杜布纳联合原子核研究所副所长的王淦昌,响应祖国召唤,放下多年从事的基本粒子研究,回国改行搞核技术。临回国前,他把节省下的 1.4 万卢布交给我国驻苏使馆,要求上交国家。

王淦昌先生在国外时曾师从迈特勒女士，在抗日战争爆发后，辗转半年后才获悉迈特勒等人的核裂变理论和实验，他在艰苦的条件还坚持做一些工作。1943 年他提出了“关于宇宙线粒子的新实验方法的建议”，提出用胶质块通过化学反应记录粒子径迹的方案，但很遗憾抗战时期不可能提供材料来实施这一方案。而 1950 年获得诺贝尔奖的鲍威尔工作的思想是与王淦昌先生一致的。清华大学当年的创建人，曾任中央大学工学院院长的顾毓琇教授曾致函王淦昌先生，函中曾提到：“忆 1946 年，本人到日本京都，秘密与汤川教授见面，汤川即以 phys. rev. 中吾兄大文相示，云大见与彼想法有相同处，后汤川到 Columbia 大学访问时，得到诺贝尔物理奖。吾兄之工作，早应该得诺贝尔奖，但天时、地利都不成熟，忠尧兄及吾兄对国内物理之影响极大，远胜于得奖也。”

王淦昌先生以他品德上的高风亮节，学识上的真知灼见，教育上的诲人不倦，深得广大物理学界的崇敬和爱戴。


吴大猷(1907—2000)

吴大猷

吴大猷先生，1907 年出生于广东高要，1925 年考入天津南开大学，1929 年毕业留校任教，两年后赴美国密执安大学留学。吴大猷是一位理论物理学家，他长期致力于研究原子分子结构及光谱、核子散射、相对论、大气物理等众多领域的工作，他具有宽广的科学基础和深邃的科学洞察力，因此，他能根深叶茂地在物理学的多个领域中进行工作，并取得成就而多次获奖。

他十分重视对年轻人的培养。早在西南联大时期，除了上课及指导优秀的大学生和研究生外，他对李政道的关怀和帮助更体现了他是爱护与培养青年的榜样。李的出色的学习成绩和独特的见解深得吴的器重和赏识，在李政道没有毕业时，他就力

荐李以公费派遣去美国芝加哥大学作研究生。1957年,李政道终于和杨振宁一起获得了诺贝尔物理学奖。吴大猷先生秉性坦率,耿直豪爽,严以律己,宽以待人,诚恳、热情,既敢于发表自己意见,又能虚心听取接受他人意见。他一直强调教学与科学研究相结合,并身体力行。因此,他不仅是执教几十年,桃李满天下的好老师,他又是论著众多、造诣深厚的科学带头人,他是一位深受国内外同行尊敬的科学家。

张文裕

张文裕毕业于燕京大学,后留校任教并进研究生院学磁学,获硕士学位。1934年,赴英国剑桥大学留学,时隔4年获博士学位。在卡文迪什实验室期间,由现代实验物理大师卢瑟福倡导的重视实验的风气,陶冶了他的科学素质。1939—1943年,他任西南联大教授。后去美国任普林斯顿大学研究员和教授。1950年,又去美国普渡大学任教授。



张文裕(1910—1992)

1948年,在普林斯顿任教时,张文裕利用多薄板云室研究宇宙线介子(μ子)与物质相互作用,从而研究它的性质。他观察到慢负μ子停止在薄板上时有低能电子发射,由电子能谱推出慢负μ子可以和原子核结成μ子原子,与电子的原子相似,称

为奇异原子。同时,费米、惠勒等人在理论上也预言了这个可能性。奇异原子的发现,打破了原子只能由原子核和电子组成的传统观念,为原子核结构及物质化学结构的研究提供了一条崭新的研究途径。另外,他还证明了 μ 子是一种非强相互作用的粒子。μ 子原子的发现已载入了现代物理学的史册。

新中国成立后,身在太平洋彼岸的张文裕期盼自己的学识能早日贡献给祖国,但屡遭美国政府阻挠,迟迟不能实现,后经多年交涉和周折,他全家终于在1956年秋返回祖国。

1961年,他在苏联杜布纳联合原子核研究所领导一个研究组,在 λ^0 超子与核子的散射研究等方面作出了贡献。1972年,在他积极倡议下建成的一套高山大云室装置上,发现了一个可能的重粒子事例,引起了国际高能物理学界的关注。1973年,在他和同事们的倡议下,成立了中国科学院高能物理研究所(他曾多年担任该所所长),对我国高能物理的研究和发展作了奠基性的工作。在核物理理论、核物理实验和宇宙实验等方面,他的主要论著有50余篇之多。

吴健雄　袁家骝

吴健雄在1925年小学毕业,随即升入苏州女师学习。在女师期间,她品学兼优,一直是班上的优秀学生,文理各科成绩都很出色,深受老师和同学们的喜爱。吴健雄禀性喜静,平日沉默寡言,善于独立思考,爱好文艺,兴趣是多方面的,课余时间总是独自在教室或寝室看书。1928年女师毕业后曾任两年小学教师。1930年,她便以优异成绩被南京国立中央大学理学院物理系录取。1982年她回母校访问时,她还深情地在南京市进香河路33号大院中找到了当年她住过的女生宿舍,并向她的丈夫袁家骝教授作介绍。

大学时代,吴健雄更是刻苦勤奋,几乎每天都在图书馆里博览群书,教授们常为她的勤奋好学所感动,因此经常给予她鼓励和帮助,使她学业更加扎实。

1934年,吴健雄大学毕业,获中央大学物理学学士学位,应



吴健雄、袁家骝在参观东南大学
自制密立根油滴仪

聘到浙江大学任教，并在当时的中央研究院工作一段时间。1936年，吴健雄刚24岁，她怀着为人类科学事业作贡献的心愿，毅然自费赴美留学深造。到美国后，考入美国著名的伯克利加州大学，在劳伦斯指导下攻读原子物理学。这是吴健雄学术长进的黄金时代。1940年，在加利福尼亚大学获物理学博士学位，继而在美国麻省罗森普顿史密斯学院和普林斯顿大学执教。1944年起，在哥伦比亚大学从事核物理研究工作。

吴健雄对物理研究造诣很深。1956年，她根据李政道和杨振宁共同提出的关于"在弱相互作用下宇称可能不守恒"的假设，以及他们的基本粒子研究理论，专程到美国首都华盛顿国家标准局低温实验室，以她非凡的实验才智，在许多第一流物理学家的协助下，做了一个以验证李、杨理论为目的的、难度极大的超低温物理实验。按理论，如果宇称是守恒的，那么，当各个钴60原子的自旋轴被排成一线时，沿轴线方向两端将放出等量的β粒子。可是实验结果是吴健雄发现放射性钴60放射出的β粒子多朝一个方向发射。这就证实了一直被物理学界推崇为金科玉律的"宇称守恒定律"不是一个自然界普遍的基本定律（图11.1），以及在基本粒子间的弱相互作用下宇称不守恒的李、杨理论。由于这一高难度的，杰出的实验的成功，不仅使吴健雄本

人，而且使李、杨登上物理学群山中的一个高峰。

1958 年，吴健雄与李、杨因此同获普林斯顿大学颁赠的荣誉物理学博士学位。

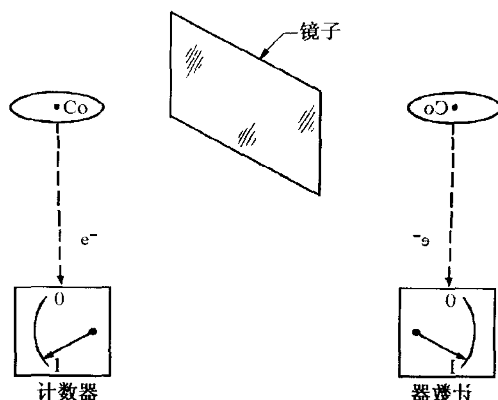


图 11.1　这两套 ^{60}Co 衰变实验的初始装置是互为镜像的，但末态电子分布不是互为镜像的，如计数器的读数不同

1963 年，吴健雄又与哥伦比亚大学其他两位物理学家（其中一位也是中国血统，吴健雄的学生莫玮，现为美国费米实验室中微子小组领导人）合作，以实验确证了 1958 年由美国物理学家费恩曼提出的在核理论进展中有许多重要影响的核 β 衰变向量电流守恒理论，费恩曼与盖尔曼分获 1965 年、1969 年诺贝尔物理学奖，吴健雄为近代物理发展做出了巨大的贡献。

袁家骝教授也是位造诣很深的物理学家，共同的理想、共同的事业把他们结合到一起来了，他们夫妇间相互支持，相互尊重和谅解，曾被同行们赞誉为“科学世界中的一对佳偶”。

钱三强　何泽慧

钱三强先生 1937 年以优异成绩考取公费留学，赴法国巴黎，在巴黎大学镭学研究所约里奥·居里夫妇的指导下开展研究工作。

他证明了铀和钍受中子打击后得到放射性（半衰期 3.5 小时）的同位素 β 射线能谱是同样的，说明它们是同一种放射性同



钱三强与何泽慧在云雾室设备上作实验(1946)

位素。这个结果对当时刚发现的裂变现象及其解释，用物理方法给予了有力支持。

1943年他重去该所工作，在此期间获得了更多的成就：

(1) 根据贝特的带电粒子穿过物质时慢化的理论，首次计算出弱能量电子的射程和能量的关系，获得了弱能量电子射程与能量关系曲线(1944年)。

(2) 他与布依西爱·巴什莱合作，用正比放大器首次测出锕的α射线的精细结构与电子内转变得到的γ谱线符合很好(1946年)。

(3) 1946~1947年，他与夫人何泽慧及沙士戴勒、微聂隆合作，首次发现铀的三分裂和四分裂现象(约300个裂变中有一个三分裂，上万个裂变中有一个四分裂)。这一发现发表后，立即引起法国、英国等各国物理学界的重视，约里奥·居里对这一工作给予很高评价，认为这是第二次世界大战后他的实验室第一个重要工作。

(4) 在铷分子光带和分解能，α粒子与质子的碰撞、射钍的γ射线，射锕软γ线的强度，用照相乳胶记录带电粒子，锕及锕K的γ射线，镭D的荧光L线谱，镓的α射线的射程，钍的裂变能等方面进行过研究。1946年他获法国科学院亨利德巴微奖金。

1948 年他和夫人何泽慧抱着他们才半岁的大女儿回到了祖国。约里奥·居里夫妇(发现镭和钋元素的玛利·居里的女儿、女婿)共同签署了一份书面意见:“十年期间,在那些到我们实验室来并由我们指导工作的同代人当中,他最为优秀。”

他是我国原子弹氢弹研制中的功臣,他曾多次指出:“科学界最重要的好传统就是学术与道德的统一,善良、正直、谦逊,实事求是,永远进取与创新,热忱帮助年轻一代,热爱祖国,关心人类的前途等,这些就是一个优秀的科学工作者的基本品质,这也是我从约里奥·居里夫妇两位导师那里得到的最重要的基本教益。”

丁肇中



丁肇中在讲演

丁肇中祖籍山东日照,父亲是留美的教授丁观海先生。1936 年丁出生在美国密执安州阿伯城,两个月后丁观海教授便带着襁褓中的丁肇中回国,当时抗日战争即将爆发,灾难深重的中国人民正在被凶残的日寇欺凌。抗战爆发后,丁肇中随父母流亡于南京、合肥等地,1948 年冬天才在台湾的台中市定居下来,他的中学教育是在国内完成的,20 岁时赴美深造。在美国密执安大学学习,先后获工程学士学位(1959),科学硕士学位(1960)和(物理学)哲学博士学位(1962)。1960 年,与美国人凯·路易丝尼结婚。

丁肇中主要从事实验粒子物理学、电子或 μ 子对的物理学、量子电动力学、类光子粒子的产生与衰变以及衰变为电子或 μ 子对的新粒子等方面的研究。1974 年夏天,以他为首的一批物理学家,在纽约州长岛的布鲁克海文美国国立实验室从事观察两个质子碰撞后产生的电子对的研究,其目的是想搞清楚某些粒子的电磁力性质。在 8 月初的实验中,当能量上升到 31 亿电子伏时,仪器的记录突然出现了异常现象,测量到的电子对数目成倍上升,经检查,测量仪器一切完好,于是进行重复实验,结果又得到同样的记录。这时,他们开始意识到可能是发现了一个新的粒子。到了 10 月底,他们总共积累了 500 多个非常难找到的同类事例,然而最使他们感到惊讶的是:测量的数据表明,这个新粒子的能量宽度十分狭窄,质量很大(3100MeV),是质子质量(939MeV)的 3 倍多,而新粒子的寿命又十分长,约 10^{-20}s,竟要比典型的 3000MeV 的强子的寿命长约 1000 倍,这些特点标志着它与以前发现的粒子有着本质的差别。

这个突如其来的发现,激动着每个人的心弦。这个实验小组为了纪念丁肇中为首参与者的这一发现,将新发现的粒子取名为"J"粒子。为了慎重起见,他们没有马上把它公布出来。不久,丁肇中到美国斯坦福直线加速器中心实验室参加学术会议,了解到他们那里也观察到了新粒子的可疑迹象,并把这个不寻常的新粒子命名为 ψ 粒子。这时,丁肇中感到事不宜迟,连夜打电话要自己助手们立即公布他们的发现。这个新粒子由于其主要发现者丁肇中与里克特未能对名称取得一致意见,因而命名为 J/ψ 粒子,这两位物理学家各自独立地作出了相同的发现,因而共同分享了 1976 年度诺贝尔物理学奖。同年丁肇中还获欧内斯特·奥兰多·劳伦斯奖。

J/ψ 粒子的发现触发了一场重新估价原有理论的热潮,从而导致当时处于摇晃状态的夸克理论又获得了新生。为了说明 J/ψ 粒子及其激发态的存在,人们已经提出很多理论解释,其中之一是设想存在第四种夸克粒子,并且把它称为粲夸克,标记为 c,而新发现的 J/ψ 粒子,则可看成是粲夸克和反粲夸克构成的

束缚态 $J/\psi=(c\bar{c})$。这些新夸克提供了支持弱相互作用的流行理论，并提供了这种理论与电动力学综合的可能性。然而，麻烦的事在于，物理学家即使利用能量极高的粒子加速器，至今仍然未能成功地找到一个单独的夸克，即使在发现了暗示夸克存在的 J/ψ 粒子之后，问题仍没有解决。

杨振宁



杨振宁

1922 年 9 月 22 日杨振宁出生于安徽合肥，其父杨武之教授曾在清华大学任教，是一位有名的数学家，杨振宁在清华园内住了 8 年。1938—1942 年在昆明西南联大读书，朱自清、闻一多是他的国文老师，赵忠尧是他的物理老师，电磁学和力学老师是吴有训和周培源。杨振宁回忆说："在大学四年和后来两年研究院期间，我学了很多东西。""在联大给我影响最深的两位教授是吴大猷先生和王竹溪先生。我在联大学士论文是跟吴大猷先生写的，他曾要我研究《现代物理评论》中一篇讨论分子光谱学和群论关系的文章，我把这篇文章拿回家给父亲看，我父亲虽不念物理，却很了解群论，他给了我狄克逊所写的《近代数理论》，我学到了群论的美妙和它在物理中应用的深入，对我后来的工作有决定性影响，这个领域叫做对称原理，我对对称原理发生兴趣，是起源于那年吴先生的引导。""在 1942 年西南联大毕业后，进了西南联大研究院，在王竹溪先生指导下，我写了一篇关于统计力学的论文，吴先生和王先生引导我走的两个方向——对称原理和统计力学，一直是我的主要研究方向。"

1945 年底，杨振宁抵达美国纽约，先往哥伦比亚大学去找费米，他以为费米还在那里担任物理学教授，他回忆说："我在中国时就听说费米'失踪'了，可是我知道他失踪之前是哥伦比亚

大学的教授，所以我到该校去问费米教授什么时候上课，使我非常惊讶而且非常失望的是哥伦比亚大学物理系秘书竟未听说过一个叫做费米的人。”杨振宁到普林斯顿去看他的老师张文裕教授，张教授告诉他，费米打仗期间曾在洛斯阿拉莫斯，现在他已经决定要到芝加哥去当教授，杨振宁就奔芝加哥去了。他后来回忆说：“我在芝加哥大学念了两年半，得到了博士学位。回想起来，确实学到了很多东西，不仅是一般书本上的知识，尤其重要的是方法与方向，即学了归纳法和掌握了新的研究方向。”

“我本来计划跟费米做实验，写一篇实验论文，可是那时我是一个外国人，不能进费米的阿贡国立实验室，费米介绍我到艾里逊教授的实验室工作。在 18 到 20 个月的实验室工作里，我发现我动手是不行的。那时候我们实验室里有个笑话，说‘凡是有爆炸的地方一定有杨振宁’。”后来在特勒帮助下，杨振宁把注意力引到他显然很擅长的理论物理上来，这是他今天不是一个实验物理家的道理。他有的朋友说：“这恐怕是实验物理学的幸运。”

杨振宁名扬于世是从 1956 年夏天开始的，当时他与李政道一起，对于“在弱相互作用下宇称是否守恒的问题”提出了疑问而引起人们高度的注意。当时物理学界存在一个所谓“θ-τ”疑难问题，这就是 θ 粒子与 τ 粒子具有几乎完全一样的性质：相同的质量，相同的寿命，相同的自旋，相同的电荷……以致人们不得不怀疑它们是否就是同一个粒子。然而，他们在“宇称”上的表现，却完全不同：当 θ 粒子衰变时，产生两个 π 介子，按照已有的知识，它们的宇称就是正值；而当 τ 粒子衰变时，产生三个 π 介子，它们的宇称则为负值，也就是说 θ 粒子与 τ 粒子衰变时，表现出具有完全相反的宇称。这样一来，θ 粒子与 τ 粒子是否就是同一粒子的问题，是无法用当时已有的理论加以圆满地解释的。于是杨振宁与李政道提出“宇称守恒的弱相互作用中并不成立。”因此，宇称的概念就不能应用在 θ 粒子和 τ 粒子。现在我们已经知道，所谓的 θ 介子和 τ 介子，实际上是一种介子叫 K

介子,当时他们还建议用β衰变实验来证实或否定他们的推测。几个月以后吴健雄等用钴60的衰变实验证实了在这种β衰变的过程中宇称确实不守恒,此后其他的实验也证实了这个结论的正确性。于是,在弱相互作用下宇称守恒原理,终于被推翻了。正是由于这一震惊世界物理学界的杰出贡献,杨振宁与李政道共同获得1957年度诺贝尔物理学奖。同年,也由于这一贡献而获得爱因斯坦物理学奖。

李政道

李政道在1926年11月25日出生于上海,自小聪明过人,对数学和物理更有着独特的兴趣和爱好。中小学时成绩一直是出类拔萃,名列前茅。1943年后先后就读于浙江大学、西南联大。1946年,尚未毕业的李政道,经西南联大教授吴大猷推荐,获得一等奖金赴美深造。吴大猷当时的推荐信是这样写的:"他是一位聪明有为的青年,思想有条理,头脑精密,勤奋好学,我相信如果得到适当的指导,他一定会成为一位优秀的物理学家。"


李政道

去美国后,李政道入芝加哥大学攻读博士学位,其时,著名物理学家费米正在那里主持一个新的研究所,李政道在费米指导下悉心钻研,于1950年获博士学位。1956年,李政道不仅被提拔为哥伦比亚大学教授,还和杨振宁一起,对当时被物理学界视为金科玉律的宇称守恒定律提出质疑。早在1945年他们二人就对此定律进行过讨论并提出一些推测。后来,他们在普林斯顿高等学术研究所相遇后,继续合作,1956年取得了惊人的进展。他们从理论上指出:"至少在基本粒子弱相互作用的领域内,宇称并不守恒。"1956年底又由哥伦比亚大学的华裔物理学家吴健雄教授和她的合作者用钴60的衰变实验证实了这一结果,这一发现是20世纪物理学史上的重大突破,并由此导致基本粒子物理学中的许多其他发现。1957年李政道和杨振宁共同获得诺贝尔物理学奖和爱因斯坦

物理学奖。1963年起李政道又回哥伦比亚大学担任该校费米讲座的第一位物理学教授。从1975年起，他又开始向新的研究冲刺，第一次引进了非拓扑孤立子概念，先后发表了10多篇论文进行深入探讨。

李政道治学严谨，作风踏实，数十年来专心致志于科学研究，从不间断。

朱棣文 崔琦



朱棣文



崔 琦

朱棣文从事的是目前世界上最尖端的激光致冷捕捉技术研究，这项研究有着非常广泛的实际用途，它帮助人类了解激光与物质之间的相互作用，特别是深入理解气体在低温下的量子物理特性开辟了道路。在原子与分子物理学中，研究气体的原子与分子相当困难，因为它们即使在室温下，也会以上百公里每秒的速度朝四面八方移动。惟一可行的方法是冷却。然而，一般冷却方法会让气体凝结为液体进而结冻。朱棣文等3位学者则利用激光达到冷却气体的效果，即用激光束(molassos)达到万分之一绝对温度，等于非常接近绝对零度(摄氏零下273度)。原子一旦陷入其中，速度将变得非常缓慢，而变得容易俘获。该技术可以用来做精确测量，特别是做“重力测量”。人们还可以利用此技术做成重力分析图，由此解开地球上的许多谜团：例如观

察油田的内层,勘探海底或地层内的矿物质;在生物科技上可以解读脱氧核糖核酸(DNA)的密码;科学家还可以借此研究"原子激光",制造精密的电子元件;也可以用于测量万有引力,进一步发展太空航系统,进行准确的地面卫星定位。科学家们普遍认为,这的确是一个了不起的研究成果。

崔琦的主要学术兴趣是研究金属和半导体中电子的性质,目前他从事电子材料基本性质等领域的研究。1982 年斯托尔默教授和崔琦教授对在强磁场和超低温实验条件下的电子进行了研究。他们将两种半导体晶片砷化镓和氯化镓压在一起,这样大量电子就在这两种晶片交界处聚集。他们将这种晶片结合体放置在仅比绝对零度高十分之一摄氏度的超低环境中,然后加以相当于地球磁场强度 100 万倍的超强磁场。他们发现,在这种条件下大量相互作用的电子可以形成一种新的量子流体,这种量子流体具有一些特异性质,比如阻力消失、出现几分之一电子电荷的奇特现象等。一年之后,劳克林教授对他们的实验结果做出了解释。在这一发现的基础上,科学家又陆续做出一些重大发现。电子量子流体现象的发现是量子物理学领域内的重大突破,它为现代物理学许多分支中新的理论发展做出了重要贡献。为了表彰他们为量子物理学研究做出的重大贡献,瑞典皇家科学院把 1998 年诺贝尔物理学奖授予德国科学家霍斯特·斯托尔默、美籍华人科学家崔琦和美国科学家罗伯特·劳克林。

除了以上十几位物理学界的科学家之外,还有周光召、邓稼先等人在高能物理以及原子弹、氢弹研究上做出了很大贡献,胡宁、何祚庥、戴元本等人在提出层子模型方面也作过很大贡献。近年来,还传来了好消息,在高能所的正负电子对撞机上,郑志鹏等人测出 m_τ 的较好的结果。这一结果被李政道认为是近年来国际高能物理学中的最大进展。

第十二讲 社会科学中的分形

当今,科学技术的发展日新月异,人类对自然界奥秘的认识正在深化与飞跃。世界正经历深刻而巨大的变化。一批崭新的科学概念和思潮正在崛起,并逐步形成各具特色的新学科,在世界向着未来的发展中迎接面临的挑战。分形论(fractal theory)诞生在以多种概念和方法的相互冲击和汇合为特征的当代。它不仅对自然科学的许多学科展现了一个又一个崭新的研究区域,而且对社会科学也同样带来冲击,使人们用新的观点来观察原来的知识领域。本讲就从分形论的基础开始给读者们作一个介绍。使读者从中领略前沿科学中的思想方法对我们的启迪。

12.1 应运而生的分形论

曼德勃罗的出色工作

曼德勃罗(B.B. Mandelbrot)在其一生漫长的岁月中,对自然界的持续思考,使他对自然界和现实世界逐步形成一幅图画,开始是不清晰的未聚焦的映像,大约历经30年的不懈奋斗,终于揭开其神奇的面纱,使其真实面目显现于世,这就是分形论。分形论的逐步成熟当然是基于既往的一批科学家的工作,也有今天更多科学工作者的出色贡献,而最终导致分形论建立的是曼德勃罗的开创性工作。

曼德勃罗于1924年出生在华沙的一个犹太家庭中,父亲是成衣批发商,母亲是牙科医生。1936年迁往巴黎。他受的教育很不正规,时断时续,他自己说从来没有学过字母表,没有学过5乘5以上的乘法表。他当过车床维修学徒工。然而当他回忆起个人的艰辛历程时,始终记住在学校与他成为朋友的老师,其

中有几位是因战争而颠沛流离的杰出学者。

二战后，他去巴黎，由于他的天赋好，虽然缺乏准备，却通过了高等师范和高等工业学院的严格考试，笔试和口试竟长达一个月，还包括绘画课。他在临摹维纳斯雕像时表现出了潜在的灵巧。数学考试他成功地靠几何直觉掩盖了缺乏训练。不管给出什么解析问题，他几乎总可以用脑海中的形象加以思考。给出一个图形，他可以设法变换它，改变它的对称，使它更为和谐。他的变换往往直接导致问题的解决。在此后的学业和工作中，他总是沿着自己的路走。由于学术思想上的尖锐冲突，他离开法国到美国居住。1958 年，他接受国际商用机器公司(IBM)沃森研究中心的聘请，开始他的异国科学研究生涯。

他孤独地搜寻道路。他尝试过语言学，解释词语的分布规律，在哈佛大学教过经济学，在耶鲁大学教过工程学，在爱因斯坦医学院教过生理学，等等。他自己说过："当我听到过去从事过的一连串职业时，常常怀疑自己是否存在，这些集合的交集肯定是空的。"他在 IBM 公司工作的初期，主要是研究商品价格，不久碰上公司非常关心的一个实际问题。工程师们被计算机和计算机之间通讯用的电话线中的噪声问题所困扰。工程师们采用加强信号来淹没噪声的方法，但某些自发噪声怎么也无法消除，而且偶尔会抹掉信号，而造成误差。他提出一种描述误差分布的方式，可以对观察到的模式作出预言。

假设把一天分成小时，可能有一小时无误差，其后一小时可能有误差，然后又可能一小时无误差地通过。随后把有误差的一小时分为 20 分钟的小段，又可以发现带有误差和完全无误差的期间。但根本不可能找到一段时间，其中误差是连续分布的。在任何一群误差中，无论时间多短，总会存在几段完全无误差的传输。无论是在小时或在秒的尺度上，无误差期间与有误差期间之比总是常数。

曼德勃罗所作的描述，正是以 19 世纪数学家康托尔命名的抽象构造——康托尔集为基础的。这种高度抽象的描述对试图

控制误差是有意义的。分析表明,不应靠加强信号来淹没噪声,而应采用适当的信号为好。

弯弯曲曲的海岸线,蜿蜒起伏的山峦轮廓线,变幻飞渡的浮云,袅袅上升的烟柱,一泻千里的江河……他反复观察,持续思考,试图从中悟出大自然的真谛。1967 年,他在美国《科学》杂志上发表了一篇题为“英国的海岸线有多长?”的论文。他对海岸线的本质作了独特的分析而震惊学术界。这篇论文也成为他自己思想的转折点,分形概念就从这里萌芽生长。

曼德勃罗于 1973 年在法兰西学院讲学期间,提出分形几何学的思想,认为分形几何学可以处理自然界中那些极不规则的构型,指出分形几何学将成为研究许多物理现象的有力工具。这个期间他关于分形的思想逐步明朗化,但并未给出明确名字。1975 年冬天的一个下午,曼德勃罗正在撰写第一本专著,他注意到物理学领域正在兴起新的潮流,于是他思索着为自己多年来所酝酿的几何学起一个有别于前人定义的名字。他的儿子刚刚放学回家,曼德勃罗随意翻阅儿子的拉丁文词典。他凝视着由动词 *frangere*(破坏)变来的形容词 *fractus*,联想到英文中的同源词 *fracture*(断裂)和 *fraction*(分数),于是创造了 *fractal*(分形),这个词既是名词,又是形容词,既是英文,又是法文。今天,这个词已为众多学术界人士熟悉,并激发了人们的巨大兴趣。

1977 年,他出版了奠基性的著作:《分形:形、机遇与维数》(*Fractal: Form, Chance and Dimension*, Freeman, San Francisco, 1977),提出了分形的三要素,即构形、机遇和维数。紧接着于 1982 年又出版了《自然界的分形几何学》(*The Fractal Geometry of Nature*, Freemen, San Francisco, 1982)。这两部著作的发表标志着分形论进入了现代新兴学科之林。

曼德勃罗的持续奋斗,获得了巨大的成功,赢得了崇高的荣誉。他是 IBM 公司的高级研究员,哈佛大学应用数学教授,美国国家科学院院士,美国艺术与科学研究院院士。近年来,他获

得了许多荣誉奖，获 1985 年度巴纳德奖，以表彰他以科学造福于人类，取得新成就；1986 年获富兰克林奖；1988 年获科学为艺术奖等。从中我们似乎也可以看到分形论所具有的旺盛的生命力。

分形论及其发展前景

分形的涵义是什么呢？我们暂且不从严格的数学定义出发，而给出一个比较容易为人们所接受的定义。这个定义由曼德勃罗于 1986 年提出：

分形是其组成部分以某种方式与整体相似的形①。

可以展开加以说明，分形是指一类无规则、混乱而复杂，但其局部与整体有相似性的体系，称这样的体系为自相似性体系，这个自相似也可以是其他形式的相似性。体系的形成过程具有随机性，体系的维数可以不是整数，换句话说，可以是分数，称为分维，记为 D_f，而分形的嵌入空间，即欧几里得的空间维数记为 d。

分形思想的基本点可以简单表述如下：分形研究的对象是具有自相似性的无序系统，其维数的变化是连续的。这是目前研究得最多应用得最广的分形，为了区别起见称这类分形为线性分形。从分形研究的进展看，近年来，又提出若干新的概念，其中包括自仿射分形、自反演分形、递归分形、多重分形、胖分形等等。有些分形常不具有明显的自相似性，正如定义所表达的，局部以某种方式与整体相似。本讲只限于对线性分形的讨论。

分形是一个崭新的概念，其思想新颖而独特，正被越来越多的人们所认识和掌握。目前，世界上许多国家都十分重视分形理论及其应用的研究工作，成为众多学科竞相引入的课题。大学里开出分形论课程，得到广大学生的欢迎，认为分形论开拓了人们洞察客观世界的眼界。许多学术刊物陆续刊登有关分形的论文。据美国科学情报研究所的计算机显示，世界上 1257 种权

① 原文为 *A Fractal is A Shape Made of Parts Similar to the Whole in Some Way*。

威学术刊物，在80年代后期发表的论文中与分形有关的文献占37.5%。从新发表的越来越多的论文中，可以看出，这一新概念涉及哲学、自然科学和社会科学，并将对各学科产生重大的影响，以新的驱动力有效地推动各学科的新发展。

国内分形研究工作还处于初始阶段，许多学者都认为分形是一个很重要的课题，并为之付出巨大的努力与热情。所以，研究波及面大，进展迅速。1989年4月曾由中国科学院国际材料物理中心举办"材料中的分形春季学院"，有力地推动了国内分形论研究的开展，同年7月，由四川大学、北京大学、武汉大学、中国科技大学和复旦大学等发起，在成都召开了我国第一届分形理论与应用学术讨论会，出版了论文集。从发表的论文看，这项关系重大的研究工作在我国发展的特点是理论与应用齐头并进，一开始就注意到理论基础与实际应用问题相结合，因而更显示出巨大的生命力。例如在农业增产、探矿、地震预报、石油开采、新材料制备和生物医学等领域都有可观的进展。

事实上，人们一旦接触到这一新概念，就会被其崭新的概念、新颖的思想所深深吸引，而投身于这项十分有趣味，又大有应用前景的研究工作之中。分形论及其应用受到多方面重视是理所当然的，因为分形现象在自然界和社会活动中广泛存在，从已经发表的论文所涉及的领域就可以清楚地看到其应用遍及哲学、数学、物理学、化学、冶金学、材料科学、表面科学、计算机科学、生理学、心理学、人口学、情报学、经贸、管理和商品学，甚至在电影、美术和书法等等领域也得到应用。分形论作为一种新理论要进一步发展，更加臻于完善；分形作为一种可以应用于众多领域的新方法，必将为更多的人所认识，得到更加广泛的应用，而产生深远的影响和巨大的作用。正如美国著名物理学家惠勒所说："可以相信，明天谁不熟悉分形，谁就不能被认为是科学上的文化人！"总之，在世界正经历着深刻而巨大变化的当今，分形论将为满足人们开拓视野、启迪思维、更新观念、激发智慧的强烈愿望作出应有的贡献。

12.2 分形论基础知识

分维数的概念

我们从小学、中学开始接触的几何问题都是欧几里得空间的几何问题。在欧几里得空间,为了确定任意一点的位置,则必须要有所需独立坐标的数目,即为该空间的维数。那么,现在把这个概念加以推广,要确定物体或几何图形中任意一点的位置,所需要的独立坐标数目,就是该物体或几何图形的维数。称此维数为欧几里得维,或经典维,记为 d。

在欧几里得空间无论空间维数高低,其维数都取整数。我们熟悉的这种整数维数也被称之为拓扑维数,拓扑维数只能取整数,维数表示描述一个对象所需的独立变量的个数。在直线上确定一个点需要一个坐标,在平面上确定一个点得用两个坐标,在三维空间中确定一个点得用三个坐标,等等。显然,这样一些研究对象都是规整又完全光滑的客体。事实上,自然界大量存在的客体是不规则的、不光滑的甚至是构型奇异的客体。这一大类客体被传统数学排斥于研究对象之外,认为是“病态”客体,不值得研究,不予理睬。分形论则以分维来表征广泛存在于自然界的一大类无序、复杂、奇异的客体。为此,先来介绍豪斯道夫维。分维是数学家豪斯道夫于 1919 年引入的。他提出连续空间的概念,也就是空间维数不是跃变的,而是可以连续变化的,既可以是整数,也可以是分数,通过具体计算来确定维数,称为豪斯道夫维数,记为 D_f,为了明确表达分形维数的分数性质,曼德勃罗把豪斯道夫维数称为分维,仍用 D_f 表示。

分数维数并不神秘。而且,从测量的角度看,维数是可变的。例如:

看一个毛线团。从远处看,它是一个点:0 维的,好比在广阔的银河系外宇宙空间看地球,地球的大小可以忽略不计。再近一些,毛线团是三维的球,好比进入太阳系后,乘航天飞机在

太空沿地球轨道飞行。再近一些，贴近其表面，它是二维的球面，甚至二维的平面，这好比我们站在旷野上环顾左右或者站在草原的小山丘眺望四周。

再近一些，看一根毛线，它是一维的线。再细看，它是三维的柱体。再近一些，它又是二维柱面或者二维平面。

再接近，看毛线上的纤维，它又是一维的。再近则又变成三维柱了……

所以说对象的维数是可以变化的，关键是我们从什么尺度去观察它、研究它，一旦尺度确定了，对象的维数就确定了。反过来，不规定尺度，问一个对象的维数，其实很难回答。这正如问海岸线的长度一样，只有告诉用什么样的刻度尺去测量，才能得到明确的结果。

作为整数的拓扑维，在拓扑变换下是不变的，所以拓扑学也叫“橡皮几何”，拓扑空间可以像橡皮一样任意拉伸，只要不发生粘连和撕断。对于分形对象，仍然可用拓扑变换来考察，但也可以用别的更好的、更形象的办法考察。例如：分形体有许多空洞，像冻豆腐一样，若用空间充填的办法测度它，则是一个好主意。

如何理解分数维呢？

从测量的角度重新理解维数概念，就会自然而然地得出分数维数的概念，实际上 1919 年豪斯道夫已经作了这种推广。我们看一个例子。

一根线段 L，它是一维的，取单位长度 A，将它的线度（边长）扩大到原来的 3 倍，看看能得到几个原始对象（单位长度为 A 的线段）。显然得到 3 个：

$$L \to 3L = 3^1 \cdot L$$

再看平面上的一个正方形 P，边长为 A，假设仍然将其线度（边长）扩大到原来的三倍，则得到 9 个正方形：

$$P \to 9P = 3^2 \cdot P$$

对于三维空间上的正方体 V，边长为 A，假设仍然将其线度（边

长)扩大到原来的三倍,则得到 27 个立方体:

$$V \to 27V = 3^3 \cdot V$$

$3L, 9P, 27V$,……,用 M 表示倍数,即 $3^1, 3^2, 3^3 \to M$

$3^1, 3^2, 3^3$ 等表示式中,3 为扩大的倍数 $\to B$

$3^1, 3^2, 3^3$ 等表示式中,1,2,3 的指数值为对象的维数 $\to D_f$。因此,若写成通式为:

$$M = B^{D_f}$$

$$D_f = \frac{\ln M}{\ln B} \tag{12.1}$$

上式对于普通的几何对象也都成立。这里 D_f 不必是整数,对具有奇异构型的分形结构,体系的维数一般是分数,只有个别情形可以是整数。这就是 1919 年豪斯道夫引进的分数维概念。所以称为豪斯道夫维。

也可以从另一角度来定义分维。上面是从放大几何对象作出定义,现在从缩小几何对象来定义分维。假定有一单位正方形,把它等分为 9 个小正方形,每个小正方形相对原来的单位正方形,每边缩小为原来的 1/3 倍,然而 9 个小正方形的总面积仍为原来的单位正方形面积,即 $9 \times (1/3)^2 = 1$。取对数就成为 $2 = \ln 9/\ln 3$。这里 2 正是该几何图形的维数。现在我们把一个 D_f 维的几何对象等分成 N 个小的几何图形,则每个小图形每维缩小为原来的 r 倍,而 N 个小图形的总和应为 $N \cdot r^{D_f} = 1$。所以分维为

$$D_f = \frac{\ln N}{\ln(1/r)} \tag{12.2}$$

容易看出式(12.2)与式(12.1)实际上是相同的,只是形式稍有不同。

让我们再从测量学的角度来定义分维。假定有一个面积为 S 的几何图形,今用半径为 r 的小圆去测度其面积,问需多少小圆才能使该几何图形全部被覆盖?容易计算所需小圆的数目为

$$N(r) = S/\pi r^2 \propto 1/r^2$$

这里小圆数目与小圆半径平方成反比。同样,若测度体积为 V

的几何对象，可用半径 r 的小球半径去填充该几何对象，则所需小球的数目应为

$$N(r)=\frac{V}{\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}\propto 1/r^3$$

推广到一般的情形，对一个体积为 A，分维为 D_f 的几何对象，要用半径为 r 的小球去测度，则所需小球数目为

$$N(r)=A/Cr^{D_f}\propto 1/r^{D_f}$$

这里 C 为结构因子。所以分维为

$$D_f=\frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)} \qquad (12.3)$$

这里得到的分维也称为柯尔莫哥诺夫容量维。定义容量维为

$$D_{cp}=\lim_{r\to 0}\frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}$$

式(12.3)与式(12.2)相一致。下面证明式(12.3)与式(12.1)实际上是相同的。也就是容量维与豪斯道夫维相一致。

假定该几何对象各棱边放大 L 倍，相应地该几何对象体积放大了 K 倍，则所需的小球数目应为

$$N'=KA/r^{D_f} \qquad (12.4)$$

如果把用来测度的小球半径 r 缩小 L 倍，而 A 保持不变，则所需小球数目仍应为 N'。这里计算小球数目的表达式变为

$$N'=\frac{A}{(r/L)^{D_f}} \qquad (12.5)$$

比较式(12.4)和式(12.5)有

$$D_f=\ln K/\ln L \qquad (12.6)$$

这个式子与式(12.1)完全一致。所以，式(12.3)也可以作为分维的定义。

分形的特点可由分维来描述。但所描述的具体对象不同，分维计算的具体形式也有多种，从理论上讲可以有无穷多种分维，这是因为客观存在的系统千千万万，以至于无穷之故。分形客体具有自相似性，所以引入相似维数是很自然的，通过对体系相似维数的计算来描述它是很贴切的。我们从考察具有整数维

数的普通图形开始，容易引入相似维数(similarity dimension)。

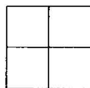


图 12.1　正方形 4 等分

假定有一边长为 $2l$ 的正方形，是简单的 2 维($d=2$)图形(图 12.1)。现将它 4 等分($N=4$)，成为 4 个边长皆为 l 的小正方形。对原正方形(整体)来说，小正方形是其局部，各小正方形(局部)彼此相同。它们经过平移或旋转后，彼此可以重复。因为是 4 等分，所以各小正方形边长是原正方形边长的 1/2(比例常数 $\beta=l/2l=1/2$)，即局部的边长是整体边长的 $\beta=1/2$ 倍。局部与整体相似，所以称局部与整体的相似比为 β。用式子表达为

$$4\times\left(\frac{1}{2}\right)^2=1,\quad 即\quad \frac{\ln 4}{\ln 2}=2$$

这里 $N=4,\beta=1/2,d=2$。写成一般表达式

$$d=\frac{\ln N}{\ln(1/\beta)}=2$$

这是 2 维图形，$d=2$ 的情形。

对一长为 nl 的线段，将它 n 等分($N=n$)，原直线(整体)成为 n 个相同的小线段(局部)，显然，每个局部都以相似比 $\beta=l/nl=1/n$ 与整体相似，所以有

$$n\times(1/n)^1=1,\quad 即\quad \frac{\ln n}{\ln n}=1$$

这里 $N=n,\beta=1/n,d=1$。其一般表达式为

$$d=\frac{\ln N}{\ln(1/\beta)}=1$$

为 1 维的情形。

再看 3 维图形，考察一个棱长为 $3l$ 的立方体。将其 27 等分，每个棱边则为 3 等分，形成 27 个($N=27$)棱边长为 l 的小立方体，如图 12.2 所示。显然，各小立方体以相似比 $\beta=1/3$ 与原立方体相似。即原图整体等分为 27 个局部，每个局部都以相似比$\beta=1/3$ 与整体相似。所以有

$$27\times\left(\frac{1}{3}\right)^{3}=1,\quad 即\quad \frac{\ln 27}{\ln 3}=3$$

这里 $N=27, \beta=1/3, d=3$。其一般式子为

$$d=\ln N/\ln(1/\beta)=3$$

为 3 维的情形。

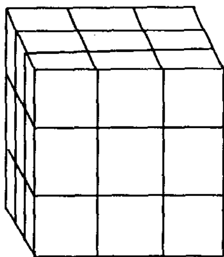


图 12.2 立方体 27 等分

归纳上述关于规则图形维数的讨论，可以对相似维数定义如下：假定某客体由 N 个局部组成，每个局部以相似比 β 与整体相似，则此客体的相似维数 D_s 定义为

$$D_s=\ln N/\ln(1/\beta)=\ln N-\ln\beta \qquad (12.7)$$

此处 D_s 不限于整数，可以是分数。显然相似维数 D_s 与豪斯道夫维数 D_f 是一致的。只是这里明确称 β 为相似比，对某些研究对象是很方便的，意义也很明确。

几个实例的介绍

(1) 海岸线的分形性质

曼德勃罗曾在美国《科学》上发表文章论述英国的海岸线有多长。分形思想由此萌芽生长。这篇文章的结论令人惊诧：英国的海岸线长度是不确定的，它依赖于测量时所使用的尺度。由于海水的冲刷和陆地的运动，海岸线是由大大小小的海湾组成，非常不规则，其长度的实际测量十分困难。如果用公里作测量单位，从几米到几十米的一些弯曲就被忽略了。测量结果为 L_1。若改用米作测量单位，则测量结果要精确多了，可以测量出很小的弯曲，但更小的弯曲，如厘米量级的弯曲就被忽略了。测量结果 L_2 当然大于 L_1。若用厘米作测量单位，那将测出能看到的所有曲折。测量的总长度 L_3 当然比前两个结果都大，即 $L_3>L_2>L_1$。所采用尺度的最小极限不过于海岸上砂粒的原子大小。使用更小的尺度也就没有意义了。对英国的海岸线，取大不列颠岛外缘几个突出点，用直线把它们连起来，得到的结果是海岸线总长度的下限。可见海岸线作为一种具有各种

层次不规则的实际事物是十分复杂的几何对象。所以在选择尺度时,在大小两端都存在自然限制。在这两个自然限制之间是无标度域。在无标度区域内,长度显然不是海岸线的很好的定量特征。因为测量其总长度时,得到的结果随尺度不同而变化。换句话说,海岸线的总长度是不确定的,所以,必须寻找更能表征其特征的参量。

当我们乘坐飞机在空中俯瞰海岸线时,就会发现,在不同飞行高度上观察海岸线,其形状大致是一样的。例如在 10000m 高空拍摄的海岸线照片,与在 2000m 拍摄的海岸线照片,大致上是相像的。两者视野不同,但两张照片在统计意义上都是相似的。从远处,在大范围看到的复杂性,当靠近时,在小范围仍可发现同样的复杂性。也就是说,海岸线具有自相似性,因此是一个分形体系。这就是说,在无标度域,尺度未能表征海岸线的复杂性。现在要问,用什么参量可以更好地表征其复杂程度?我们将看到,分维是一个更好的参量。

假定有一张绘制得十分精确的某海岸线地图,可以用圆规来测量其长度。我们固定圆规两脚张开为 r,然后沿着海岸线一步一步地测量。若测量得到的步数为 $N(r)$,则海岸线的长度 $L(r)$可以写成

$$L(r)=N(r)r$$

由前述讨论可知,上式可改为

$$N(r)=C(1/r)^{D_f}$$

D_f 为分维;C 为常数,这样把分维引进测量海岸线总长度后,可得

$$L(r)=Cr^{1-D_f}$$

这就表明 D_f 刻画了海岸线总长度 $L(r)$随着测量单位 r 变化的快慢,也就是描绘海岸曲折的复杂程度。经过实际测量在双对数坐标纸上作 $\ln L(r)$对 $\ln r$ 的曲线,由曲线的直线部分的斜率 $R=1-D_f$,即可得到分维 D_f 值,选定测量单位,就可以确定海岸线的总长度。

曼德勃罗的研究工作给出，澳大利亚海岸线 $D_f=1.13$，南非洲海岸线 $D_f=1.02$，英国西海岸线的分维 $D_f=1.25$，西班牙与葡萄牙的国界线 $D_f=1.14$，分别表示在图 12.3 中的 a，b，c，d。可见，各具不同弯曲程度的海岸线其曲折的复杂性反映在分维值 D_f 的大小中。而 D_f 值可以通过计算获得，这样问题就解决了。但是，实际上还有没解决的问题，既然海岸线是不规则的，又怎么能进行计算呢？也就是海岸线是自然形成的无规则分形，如何做数学计算？其实，实际计算时，仍然将用有规则分形作为模型，照此模型进行计算。

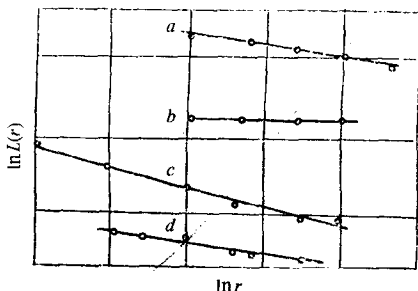


图 12.3 海岸线分维测量

(2) 柯克岛和谢宾斯基海绵

冯·柯克(H. von Koch)在 1904 年首先考虑过的一种几何图形，为曼德勃罗的不可捉摸的海岸线问题提供了理想的数学模型。我们把这种几何图形称为柯克岛。图 12.4(a)表示从一般外空火箭上看到的柯克岛。从这样的距离看，其形状仿佛就是一个等边三角形。当火箭飞近地球时，逐渐看清了这个等边三角形的每条边上，还包含一个海岬，它们形成一个小的等边三角形，位于每边中央 1/3 处(图 12.4(b))。如果图 12.4(a)的周长为 3，那么图 12.4(b)的周长将是 $3\times\left(\frac{4}{3}\right)=4$。当火箭进一步靠近地球，你会发现原先看到的 12 条小边每一条同样包含有一个位于中央 1/3 处的等边三角形海岬(图 12.4(c))。现在图

形的周长变成 $3\times\frac{4}{3}\times\frac{4}{3}$。图 12.5 是靠得更近时所看到的岛的样子，显露出更多层次的细节，使我们对柯克岛的"真正"(?)样子能有某种印象。

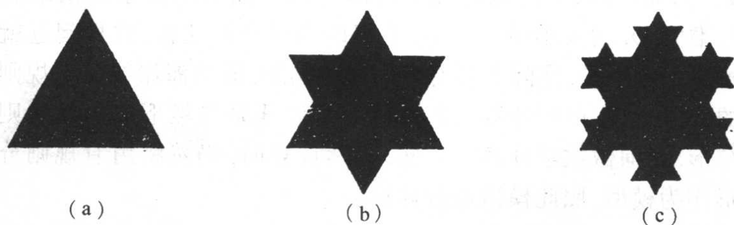


图 12.4　柯克岛的构造

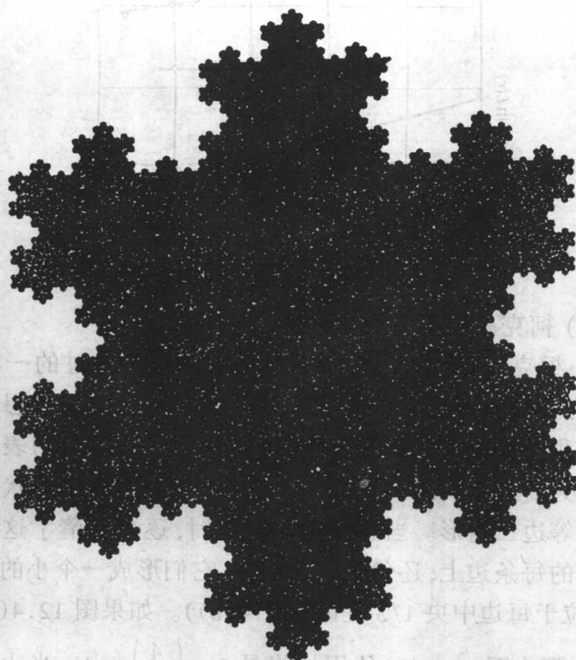
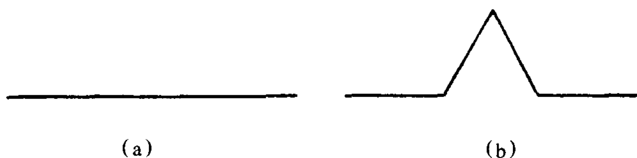


图 12.5　柯克岛成形

对数学家来说，柯克岛有一个很好的特征，即相继层次的细

节所显示的规则性。每一步，海岸线每条线段的中央 1/3 都被两条小线段取代，其中每一条都等于原线段的 1/3，如图 12.6 所示。



(a)　　(b)

图 12.6 柯克海岸线的产生

通过对图 12.4 和图 12.5 的考察，你也许会推测柯克岛具有一个(数学上)确定的形状，而在人眼所能区别的范围内图 12.5 是它的很好的近似。在数学上，柯克岛的精确海岸线是这样一条"曲线"，它是一个无限逼近序列的极限，图 12.4 给出了该序列的前三个图形。从数学上看，这样极限曲线是完全确定的，像任何其他曲线一样由无限多个点组成，这些点排列在一起而形成"线"。这种极限曲线的过程类似乎将数$\frac{1}{3}$看成无限十进小数序列

$$0.3, 0.33, 0.333, 0.3333, 0.33333, \cdots$$

的极限过程。

因为柯克岛是一个数学上确定的平面区域，它将有一个确定的面积。这面积的具体数值当然取决于所使用的测量单位，但它肯定是有限的(它可以作为一个数列的极限而计算出来，颇似上述例子中的数 1/3)。事实上，它恰好等于图 12.4(a)中三角形面积的 1.6 倍；那么，这块有限面积的海岸线有多长呢？柯克过程的每一步都使"海岸线"的长度扩大 4/3 倍，当柯克曲线(作为极限海岸线的称呼)被达到时，扩大因子 4/3 出现了无限次，因此柯克曲线的长度将是无限大数。

一块有限的面积何以会有无限长的边界呢？图 12.4 和图 12.5 本身已提供了回答。边界曲线随着整个长度不断折曲，对于向终极曲线的每一步有限逼近来说，只要采用适当的比例(放

大率），这种折曲就可以被完全画出来，然而真正的柯克曲线却有无限多折曲，作为一条曲线（数学意义的曲线，虽然它有无限多能画出的折曲），你可能会以为它是一维的，其实不然，尽管柯克曲线通过上述方法得到的每一条近似曲线都是一维图形，但极限曲线却不是。由于其方向改变了无限次，我们进入了一个陌生的世界——实际上，“方向”这个词已不复适用。因此我们不能指望通过所谓“旅行方向”来确定柯克曲线的维度。我们必须寻找其他的、与方向无关的途径来建立维数的概念。

合适的做法是采取符合柯克曲线特性的途径。关键的性质是所谓自相似：部分与整体相似（只是缩小了比例）。

假设有一个 D 维图形，将它分成 N 个与整体相似的部分。那么整体图形与每个部分之间的相似比 r（即整体比部分的放大因子）将由下式确定：

$$r = \sqrt[D]{N}$$

（因为是 N 维图形，r 的值应当按单个维度计算，所以取 N 的 D 次根是必要的。）

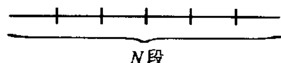


图 12.7 直线段的自相似

例如，假如我们取一根直线，将它等分成 N 段（图 12.7），那么每一段恰好等于整体长的 $\frac{1}{N}$。因此相似比为 N，这恰好就是当 $D=1$ 时由上述公式所得到的数值。

再如取一个矩形（$D=2$），通过垂直与水平 k 等分而将它分成 N 块（图 12.8），那么情形如何呢？这时整个图形恰好被分成 $N=k^2$ 个与整体相似的全等小矩形，而整体对于任何一小部分的（线性）比 r 由 $r=\sqrt[D]{N}=\sqrt{N}=\sqrt{k^2}=k$ 给出，这恰好又是你所求的数值。

在这两种场合，我们似乎一直在兜圈子，但这是因为我们处理的是司空见惯而又毫无疑义的情形。假如我们用同样的方法去分析柯克曲线，就会得出完全出乎意料的结论。对柯克曲线

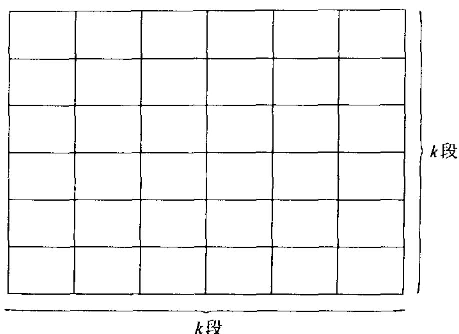


图 12.8 矩形的自相似

我们不知道它的 D,但 N 和 r 值却很容易确定。为此只需考察一下产生该曲线的复制过程。我们首先来看海岸线的一段(图 12.6(a))——任何一段都行,因为全都同样。在复制过程中(图 12.6(b))每一段都被 4 条线段代替(因此 $N=4$),每小段都等于原线段的 1/3(因此 $r=3$)。这对海岸线的每一段都成立,所以对整个海岸线亦必成立,于是根据前面确定的公式有

$$3=\sqrt[D]{4}$$

那么 D 等于多少呢?当然不是整数。惟一的计算方法是利用对数。若在上述方程式两边取对数,将得到

$$\ln 3 = D^{-1}\ln 4$$

借助对数表(或利用能算对数的计算器),就可以算出 D 值,若精确到小数后 4 位,则有

$$D = 1.2618$$

这样,柯克曲线是一个具有分数维的数学实体。

不只是柯克曲线可以有分数维,利用自复制过程还可以构造出同样稀奇古怪的“曲面”和“立体”。例如从一个正方体开始,相继挖除“中间”部分,最终(即重复无限多次后)将得到一个叫谢尔宾斯基(Sierpinski)海绵($D=2.7628$)的立体,其构造如图 12.9 所示。通过对图 12.9 的考察并利用公式

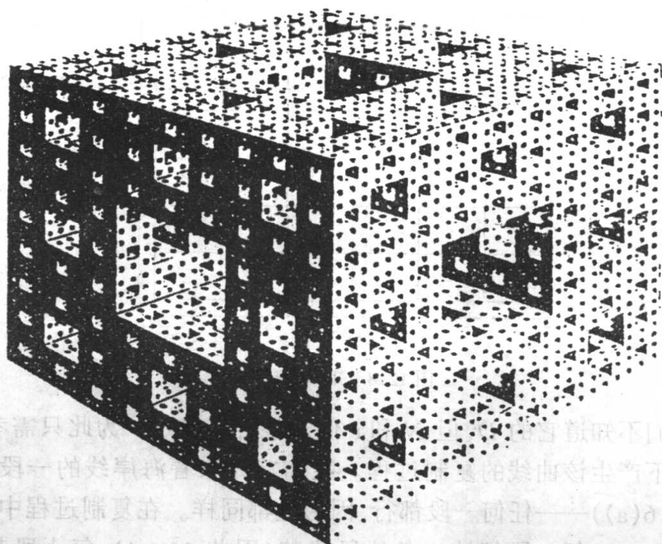


图 12.9　谢尔宾斯基海绵成形

$$r = \sqrt[D]{N}$$

或两边取对数

$$D = \ln N / \ln r$$

就可以验证与谢尔宾斯基海绵有关的两个 D 值。

具有分数维的图形称之为分形(fractals)，分形几何就是以这类图形为对象的数学分支。

12.3　自然分形与社会分形

分形论的自相似性概念，最初是指形态或结构的相似性。也就是说，在形态或结构上具有自相似性的几何对象称为分形。研究这种分形特性的几何称为分形几何学。而后随着研究工作的深入发展和领域的拓宽，又由于一批新学科，如系统论、信息论、控制论、耗散结构理论和协同论等相继涌现的影响，自相似性概念得到充实与扩充，把信息、功能和时间上的相似性也包含

在自相似性概念之中。于是,把形态(结构),或信息,或功能,或时间上具有自相似性的客体称为广义分形。

总结起来,fractal = initiator + generator + interactions,可用下列三式表示:

分形 = 原形 + 生成元 + 迭代

分形 = 公理 + 产生式 + 解释

分形 = 初条件 + 输入 + 反馈

广义分形及其生成元可以是几何实体,也可以是由信息或功能支撑的数理模型;分形体系可以在形态、信息或功能各方面同时具有自相似性,也允许其中某一方面具有自相似性;分形体系中的自相似性可以是完全相同,这种情况是不可多得的,也可以是统计意义上的相似,这种情况占绝大多数;相似性有层次或级别上的差别。级别最低的为生成元,级别最高的为分形体系的整体。级别愈接近,相似程度越好,级别相差愈大,相似程度越差,当超出某一范围时,则相似性不复存在。这涉及无标度区域或标度不变性范围问题。在本讲中不可能作更多阐述。

在自然界、社会和思维领域广泛存在分形现象,所以,分形论已被引入众多学科领域,为各有关学科提供新颖的思路和有用的新方法。

分形论的研究领域大体上分为两大类,即自然分形与社会分形。

自然分形所涉及的范围极广阔,内容十分丰富。遍及数学、物理学、化学、材料科学、表面科学、计算科学、计算机科学、电子学、微电子技术、生物学、生理学、医学、农学、天文学、气象学、地理学、地质学和地震学,等等。总之,自然界客观存在的或经过理论抽象的,具有自相似的客体,称为自然分形。

当对具有自相似性的具体系统进行分形分析时,根据系统的具体特点,又可以分为几何分形、功能分形、能量分形、信息分形和重演分形等。

自相似性表现在系统的几何结构和形态上的,称为几何分

形。如具有线状缠绕的高分子链为线状分形,具有表面自相似结构的催化剂表面,为表面分形,材料制备过程中形成的凝聚团具有体积分形的特性等。

在功能或信息方面具有自相似性的客体,分别称为功能分形或信息分形。这两方面研究的领域十分广阔,从植物生长到人类发育,从都市边界线的变迁到气象预报,都关系到功能和信息的分形性质。一个胡萝卜的根细胞可以培养出一株完整的胡萝卜。人类的一个受精卵可以在母腹中发育成一个人。可见细胞是一个分形元,它内涵着整体的全部功能和信息。都市边界线的变迁则记叙了城市历史演变的信息。气象预报的计算机输出波形反映了成千上万信息的结果。中医的人体穴群,在功能和信息上是人类各个器官的缩影(有些问题还存在争论)。

无线电通信中的能量传输和地震波的传播等能量传递过程存在着自相似特征。能量传播方面存在自相似性的系统,称为能量分形。

系统在演变过程中,在时间轴上具有自相似性质称为重演分形或时间分形。如生物学中的重演定律就是重演分形的典型例子。实际上,整个有机界的发展史与个别有机体的发展史之间都存在着惊人的相似。太阳黑子爆炸,地震周期重演等,都是在时间轴上表现出系统发展和演变的自相似性。

社会科学是研究人类社会各种文化现象的。社会科学从来十分关注自然科学的新理论和新成就,常常乐于吸收自然科学领域提出的新概念和新方法。当代一大批新科学先后问世,分形论是最年轻的一支新军。分形概念已走出自然科学的天地,触角伸向广阔的社会科学领域。社会科学的学者们十分敏感于这一新兴学科的新颖思想和独特的方法,它很快被引入到广阔的社会科学领地,作为社会科学定量化和现代化的新方法和新途径。现着重介绍几种社会科学中的分形。

经济学中的分形

曼德勃罗首先将分形概念引进经济学。在 1963 年他就注

意到市场商品价格的变化与分形之间的关系。发现价格变化与时间之间存在不寻常的函数关系，显示出统计自相似性质。由此，他求得19世纪棉花价格变化的分维 $D_f = 1.7$。他还研究了利润变化、股票市场的行情记录，居民的收入及资本和财产的分布等经济问题。他得出的结论是所有这些问题都与分形有关。最近，有人对近期欧洲证券价格和利率变化作了研究，其结论是仍可以用分形的语言加以描绘。

经济弹性是经济学的基本概念。它表征经济系统变量变化之间的相互影响关系。弹性具有分维性质，是由于它揭示了经济系统中某些参数变化所表现出来的自相似性，及参数变化之间的不规则性和复杂性。

在这里，把分维看作随观测尺度(标度)变化的函数，定义分维为

$$D_e = \frac{d\ \ln N(\varepsilon)}{d\ \ln\varepsilon} \tag{12.8}$$

在经济学中，一个变量 y 可以表示为另一变量 x 的函数，即可以写成 $y = f(x)$，则 y 关于 x 的弹性定义中有应力、应变的比例关系。这样就可有下式：

$$\sigma = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy}{dx}\cdot\frac{x}{y} \tag{12.9}$$

显然有

$$\sigma = \frac{d\ \ln y}{d\ \ln x} = \frac{d\ \ln f(x)}{d\ \ln x} \tag{12.10}$$

比较式(12.8)与式(12.10)，有

$$\sigma = D_e \tag{12.11}$$

即经济弹性 σ 与经济弹性分维 D_e 相等。所以，经济弹性刻画了用自变量 x 作标度单位去度量因变量 $f(x)$ 时，所表现出来的某种不规则和依赖程度。

假定 N 是社会的商品产量，ε 是社会有效需求，则根据式(12.8)，表示用 ε 作为标度时，全社会的商品总产量所呈现的某

种不规则程度。凯恩斯学派认为社会商品产量 N 完全由社会有效需求 ε 决定,这是决定论的观点;而理性预期学派则认为社会商品产量 N 完全不能由社会有效需求 ε 决定,是一种随机性观点。分形论则认为社会总产出与社会总需求的关系是非常复杂的。既不是完全决定性的,也不完全随机性的,而是介于两者之间。它们的关系可能是周期的,也可能出现某种混沌局面。当今资本主义世界的"滞涨"局面,实际上就是这种混沌现象的实例。

经济弹性分维 D_e 刻画了社会总产出关于有效需求的某种不规则程度,或混沌程度。所以可以从 D_e 的大小来判断整个社会的经济形势,从而采取相应的经济政策。当 D_e 较小时,说明社会总产出关于社会有效需求的不规则程度较小,因而刺激有效需求对社会总产出的影响程度较小,这种情况下,经济部门不应该刺激需求,而应在供给方面挖掘潜力;当 D_e 较大时,说明社会总产出关于社会有效需求的不规则程度较大,因而刺激有效需求对社会总产出的影响较大,在这种情况下,经济部门可以采取刺激需求的政策,从而使生产得到发展。

又例如需求—价格弹性,根据分维的意义,可以理解为商品需求与价格之间变化的不规则程度。其规律是生活必需品、日用品和一般劳务的需求与价格变化之间的分维值 D_e 较小;而非必需品、奢侈品、娱乐品和特殊劳务的需求与价格之间变化的分维 D_e 较大。说明前者不规则性较小,后者则较大。

对系统的某些变量随时间而演化的关系进行跟踪记录就得到该变量的时间序列,分析时间序列就可以得到系统的动态性质。经济系统的时间序列通常具有较强的时滞性和非线性效应,即经济系统所表现出来的长程相关性和长程记忆性。这也是用不同的时间标度去观察系统时,表现出的统计相似性,即经济分形。

管理科学中的分形

管理科学有着十分丰富的内涵,是一门横跨自然科学与社

会科学的综合性学科，它不仅涉及生产关系和上层建筑，而且涉及生产力的组织管理和利用。这里要简要讨论管理的组织模式及城市的管理布局问题。

在管理科学中，从微观到宏观，从程序化到非程序化，从垂直到交叉，在组织、方法和手段上都表现出层次、结构、功能和信息的相似性。从局部管理到整体管理，从低级管理到高级管理，从经济财务管理到行政科技管理等，也具有自相似性。"以点带面"，把点的经验推广到面上去。这种事半功倍的管理方法与分形论的自相似性原理不谋而合。可以认为，分形论将成为管理科学的基础。

20 世纪以来，世界城市化的进展逐步加快。世界城市人口占总人口的比例从 1920 年的 23.6% 上升到 1981 年的 52.2%，目前上升趋势仍在继续。城市的调整发展，带来交通拥挤、环境污染、社会治安等许多问题。所以，城市的管理规划已成为全社会所瞩目的问题。分形是大自然雕琢的优化结构，用分形原理来管理城市是近年来崛起的一个新分支。研究发现，城市边界、城市商业网点、生活服务设施、房屋建筑、道路分布……在一定程度上都满足分形结构。而且在一个大的地区范围内，各类城镇的分布和结构也具有统计自相似性。

思维分形

思维是人类对事物的认识过程，是人类大脑的特殊功能，是人同客观世界相互作用中的信息增殖。思维是智慧的源泉。恩格斯把思维称为"地球上最美丽的花朵"。思维科学是研究人的有意识思维的特点、规律、历史和模拟的科学。由于人类在认识和意识上具有自相似性特征，所以称之为思维分形。人类社会存在错综复杂的交往联系，所以每个人的思维都反映周围许多人的思维，他们每个人又反映别人的思维，是一个无穷无尽的序列。也就是说，每个人的思维都在某种程度上反映了整体的思维。人类每个健全人体的认识过程，都是进化史的简略而迅速的重演。

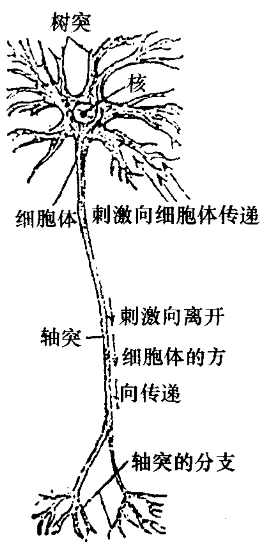


图 12.10　神经元

思维科学的研究方法有内省法、微观法和模拟法等。内省法是自己考察自己的思维过程，即以自己的思维作为研究对象，用现代技术手段研究思维过程。微观方法是以人类大脑的砖石——神经元为对象进行分析研究。人脑约有 5000 万种神经细胞，细胞总数约 1000 亿个。图 12.10 显示神经元的分形结构。细胞体分支成树突，树突又分成更细的纤维。这种结构可能与神经系统的混沌有关。研究每个神经元在思维过程中的电化学变化，及其在思维过程中的作用机制，从微观层次上认识思维的规律，这些都是微观方法的研究内容。模拟方法是通过模拟大脑的结构，研究人工智能的途径和技术。人工智能是人的思维的物化、模拟和复制。模拟是以相似性原理为基础的。

开展思维科学研究有着十分重要的意义。通过对思维过程的深入认识将充分发挥人类大脑的潜力，使人们自觉按照思维规律办事。

利用时间序列分析方法测定人的脑电波的分维，尝试以此来探索思维的奥秘。事实上，大量社会现象所表现出来的统计自相似性正是思维具有分形性的有力佐证。分形理论在思维科学中的应用，将有助于推开神秘莫测的思维大门。

情报分形

信息、情报是普遍存在的一种社会现象。

情报工作已形成巨大的系统，情报的搜集、检索和传递等在一定程度上具有统计自相似性，情报机构网络在某种意义上也

是一种分形机构，用分形模型加以研究可提取有用的规律，对情报系统的设计、组织管理，情报的度量和情报基础理论的完善等，分形论都将提供有力的分析手段。

城市边界的变化

城市边界受到多种因素的影响，随着时间的推移，这些因素在不断变化，其中包括政治变化、战争、城市发展、工业交通、运输状况、建筑技术、社会管理及自然生态环境约束等。由此可见，从城市边界的变迁过程，能够得到多方面的信息。

地理学家和市政规划工作者在实际工作中发现，城市边界线的形状由于多种因素的制约，常常是很复杂的，有时具有分形的特征，可以用处理海岸线的方法来处理城市边界线，同样可以计算其分维。随着时间的流逝，城市边界线发生变化，分维值也随着变化。于是分维值与城市的历史进程相联系。通过分维 D_f 的研究，就可以捕捉到许多曾在这个城市发生过的历史事实。

艺术分形

音乐、美术和文学是人类智慧的产物，反过来又作用于人类，成为人们精神生活的组成部分。听一首悠扬悦耳的乐曲，看一件赏心悦目的工艺品，读一篇生动感人的诗作，令人如饮甘醇美酒，回味无穷。艺术的感染力是令人惊叹的，而分形艺术更令人陶醉。在音乐、美术和文学中，随时都可捕捉到分形的踪影。如分形山脉、分形云彩、分形湖泊和分形树林等，其技术之高超，几可乱真。曼德勃罗以“分形工艺与科学和工业相互渗透”的应征文章赢得 1988 年度科学为艺术奖。该奖表彰他在促进艺术、科学和工业之间相互渗透方面的重大科学创新。可以相信分形图形将对绘画、雕塑、建筑设计、印染工业、装潢和广告设计等产生深远的影响。文学分形则是指创作中素材取舍和提炼都与自相似有关。我国优秀的古典小说《红楼梦》通过贾府的兴衰，揭露社会的缩影，是一个社会分形元。就语言艺术成就来说，《红

楼梦》代表了我国古典小说语言艺术的高峰。作者曹雪芹的三言两语,都具有自己独特的个性,读者仅凭借这些语言就可以判别人物。这里我们看到相似性原理在文学中得到充分体现的光辉典范。所以《红楼梦》具有永久的艺术魅力,以不朽名著的地位卓立于世界文学之林。

音乐与分形是否有关系呢? 回答是肯定的。美妙的音乐受到分形原理的支配。可以预料,随着分形音乐研究的深入,更为美妙动听的音乐将不断涌现,为人类提供更具美感更能激发共鸣的音乐作品。

第十三讲 21世纪科技发展新趋势：生物—物理大融合

引言

近年来，国际科学界一种越来越趋同的共识是未来科学的重大突破将越来越有赖于生物学和物理学的结合。认为21世纪是生物学世纪无疑是有充分根据的，但生物学要有大突破必须寻求物理学和其他学科的支持。为了顺应这种正在增长的趋势，以美国为例，目前，一批全美拔尖的研究性大学已在纷纷筹划一种新的方式，使物理学和生物医学专家联合在一起。这种趋向的最有力推动者来自斯坦福大学，这所大学的诺贝尔奖得主、物理学家朱棣文和生物学家詹姆斯·斯布迪许正着手探索创建一个有50名成员的研究中心，这些学者来自从应用物理到临床医学等多种学科。芝加哥大学也在筹建类似的多学科研究中心，并设有兼跨生物和物理的综合研究所。芝加哥大学的耗资1.1亿美元的多学科研究中心大楼，于2002年建成。伯克利加州大学建造了新大楼，为生物工程学和分子生物学及物理学科的学者研究使用。此外，普林斯顿大学早在1999年就宣布将投资4000万美元，为跨学科的基因研究中心建造一幢与该校生物学大楼相连的研究大楼。

上述的斯坦福大学研究中心，建成后将是斯坦福大学内最大的研究中心，该项称为Bio-x的工程将于2002年建成，Bio-x名称本身反映了设计者把生物学与其他学科交叉综合的主旨。斯坦福的这一计划吸引了一些著名科学家的加盟，如普林斯顿大学的生物物理学家史蒂文·布洛克，布洛克是利用光钳技术研究分子马达的先驱性学者，他已于1998年9月加盟斯坦福的这

一新中心。

以前,我们在介绍生物技术时,总是把传统生物技术和现代生物技术分别给予介绍,从当前的情况来看,这两个学科的相互交叉渗透已经得到物理学界和生物学界有识之士的认同,并纷纷加盟,主动披甲上阵,本讲我们不可能讨论更深的内容,只准备介绍三个主要方面供读者参考。

(1) 从物质到生命

(2) 生物技术

(3) “Bio-x”的介绍

13.1 从物质到生命

1. 有机物的形成

生命起源的先决条件无非是物质与能量。物质与能量是宇宙一开始就存在,其自身必然具备的,只是当初这种物质与能量的形式还不足以产生生命而已。

在大约150亿年前的一个特定瞬间,宇宙间物质被推测为集中在比一角金属币还小的区域内,此后我们能够观测到的所有物质以难以置信的高速度开始膨胀(即所谓的大爆炸),同时温度也开始下降。这就是宇宙的初始状态,时间很短,只有大约10^{-12}秒。当温度下降到10^{15} K时,我们可以用现代物理学的理论来描述当时的物质与能量的状态了。此时的宇宙理应充满了高能核物理学中已知的各种类型的粒子和它们的反粒子一起组成的气体,如有电子与反电子、夸克与反夸克等。它们在一个能量海中自由地漫游。这些粒子与反粒子在碰撞中不断被湮没与创生。随着宇宙继续扩展与降温,创生变得比湮没慢,并且几乎所有粒子与反粒子都消失了。如果在数量上电子没有稍微超过反电子,夸克没有超过反夸克,那么今天在宇宙中实际上就不会有电子与夸克这样的普通粒子存在。正是这种早期物质超过反物质的量,估计大约为10^{10}分之一,它残存下来在1分钟后形成

轻的原子核。这是当宇宙膨胀到如今太阳系大小范围时，自由夸克就开始约束到中子和质子内，出现了质量较显著的粒子。在宇宙再增大1000倍后，质子和中子又结合成原子核。1个质子是氢原子核，1个质子结合1个中子是氘原子核，2个质子结合2个中子是氦原子核。到这一步，环境温度仍然很高，原子核还不能俘获电子。中性原子只是到膨胀已经历了一个很长的时间，约30万年，宇宙扩大到目前宇宙的千分之一之后，才大量出现。中性原子开始聚结成气体云。

在原子核阶段，各种原子核与基本粒子就开始组成的原始"汤"（后来就是原子），万有引力的作用造成了特别稠密的区域，从而形成各个星系，在星系内部，稠密的气体云又产生出大量的恒星。

这些恒星内部温度仍然很高，核反应还在继续进行。周期表上各种元素还会不断地生成。不仅生成了星体本身的各种各样元素的原子，而且还进一步生成了各种各样的分子。也正是由于恒星生命期间不断发生的核反应（核聚变）保证了能量在几十亿年期间的连续供应，才使生命和智能有时间发育出来。恒星是它自身引力向内吸引和内部炽热气体向外压力之间达到精巧平衡的气体球。在恒星球心附近，温度和密度最高。在那里，尽管有着质子之间的电力排斥，它们还是被紧密地推挤在一起，以致强核力和弱核力能够发生作用。氢核（质子）聚变成氦核（两个质子加两个中子），同时发射出两个正电子、两个中微子和能量。因此，氦不仅在大爆炸中产生，在星核中也会产生。长期稳定的氢聚变导致了氦在星核中的积累，由此使恒星本身发生了急剧的变化。每个氦核要锁定4个核子，星核就收缩和加热（恒星中心温度可达1500万度），温度和密度的增大就维持了压力的平衡。恒星作为整体就变得不那么均一了。星核变得越来越小，其外层相对来说就扩大了好几十倍。不仅如此，元素的合成也不仅仅局限到氦为止。接着发生各种核反应。例如：

氦核+氦核→铍核（质子数4）；

铍核＋氦核→碳核(质子数6)；

碳核＋氦核→氧核(质子数8)。

有氢核参加时就能生成锂核、硼核、氮核(质子数分别为3、5、7)。总之,大爆炸中产生了氢核和氦核,它们在星核中不仅聚变成更多的氦核,而且继续发生核反应生产周期表中各种元素原子的核。但各种反应的速率是不一样的,因而宇宙中各种元素(可看作是原子,原子核俘获电子后就成原子)的相对丰度是不一样的,见图13.1。注意图中丰度是以对数表示的,不能直接以高度来作比较,每增1单位高度,相对丰度就增加10倍。图中可以看出,H与He丰度特高,Li、Be、B就很小,以后各元素都是一高一低,较轻元素中以C、O为最高。后面较重元素中以Fe为最高,Zn以下的元素丰度就较稀少了。

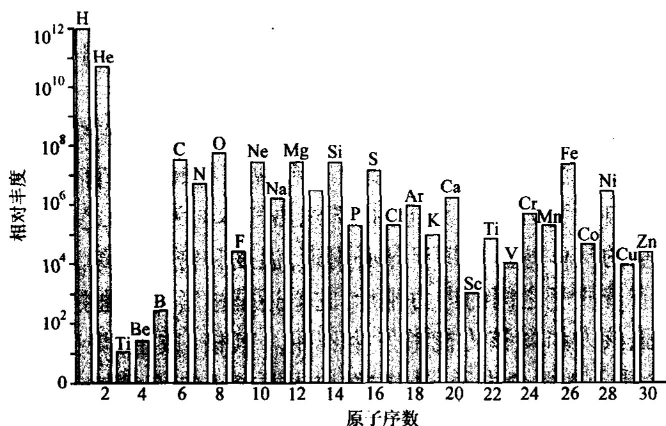


图13.1　宇宙中元素的相对丰度

恒星在生成各种元素的同时,大量能量被辐射出来,其本身温度就会变冷。这时,一颗像太阳那样大小的恒星就变冷变成红巨星,但仍会发光,会再持续几亿年(在宇宙演化史中,这是个不算大的数)。红巨星会抛出它的一些外层,形成所谓行星状星云。这就是行星的来源。行星核内仍可有较高的温度和压力。但它辐射出来的能量就几乎没有了。行星由于万有引力的作用

绕着原来的恒星转。行星四周还会有卫星。我们的太阳系就是这样形成的。

恒星发展到最后所有的燃料都用光了，红巨星就凝结成白矮星，这颗星就“死亡”了。当然，它仍存在于宇宙中。

铁核在核物理中占据一个特殊的位置。广而言之，在宇宙的成分中也占据一个特殊的位置。铁核是一个最紧密约束的原子核。比铁核轻的原子核当其在一起聚变时要释放出能量。然而要形成比铁核重的原子核则要消耗能量。一旦恒星形成了一个铁质量核，它就不可能通过聚变产生能量。恒星最终也能作为超新星而爆发，比铁重的核在这种爆发中形成。

宇宙中有了各种元素的原子，进一步就会生成分子。氢原子会生成氢分子(H_2)，同时还有氧分子(O_2)、氮分子(N_2)等，氢与氧、碳、氮作用，生成水(H_2O)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、氨(NH_3)等。在星际云中已发现有100多种分子。1984年就有人报道了在银河系中心附近的正在形成恒星的云(叫人马座B2)中发现了最简单的氨基酸——甘氨酸。这一发现是非常引人兴趣的，因为生命物质就可能由此而产生。

总的来说，宇宙在演化中为生命的出现建立了先决条件。从物质上说，在宇宙中有了元素及其化合物，尤其是C、O、H、N、S等元素。从能量上说，温度必须温和，有利于生命体的发生与进化，也必须能使生命前有机物通过化学反应而产生有生命活力的物质。

生物是由蛋白质等复杂有机物构成的。因此，生命诞生以前阶段必定经过无机物——简单有机物——复杂有机物，这样的非生物的化学进程而衍变的，这是在地球诞生以前几亿年内发生的事情，为了在实验室内重现原始地球的状况，科学家们做了研究性的实验(图13.2)，1953年美国芝加哥大学的H.犹赖和S.米勒先假定原始地球大气中有甲烷(CH_4)，氨(NH_3)，水(H_2O)，氢(H_2)，若将这些气体的混合物用火花放电的方法给予其能量，模拟在原始地球上，有强的紫外线照射，有雷电、太阳等

的存在，有高能粒子作用，另外，还有自然界的辐射能，火山、陨石等能量源，在实验中若加上6万伏电压经过一定时间后，其能量则与原始地球的自然能量的5亿年的作用相当。实验进行后，烧瓶中的水变成暗绿色，对之进行分析时可发现有氨基酸等有机物质，氨基酸是构成蛋白质的主要成分，则可得如图13.3的变化。

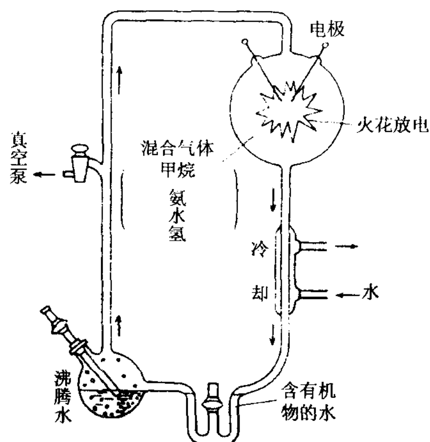
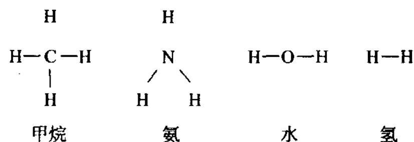


图13.2　犹赖-米勒实验



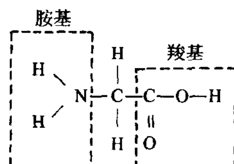


图13.3　从原始大气合成单纯氨基酸

通过对氨基酸的研究发现，氨基酸总共有19种，德国血统的美国生物化学家布兰德(Erwin Brand)为氨基酸提出一种书写符号，现在已经普遍采用了。为了避免和元素符号混淆，他采用每一种氨基酸的英文名称的前三个字母，而不只用头一个字母。其中有几个符号比较特别：用CyS代表胱氨酸，表示它的两半通常各结成不同的链；半胱氨酸是CySH，以别于胱氨酸；异亮氨酸用Ileu而不用Iso，因为iso是很多化学名词的字头。用色层法进行分析，能准确地估计出各种蛋白质的氨基酸含量。例如，已经发现，血液的一种被称为“血清白蛋白”的蛋白质分子含有15个甘氨酸，45个缬氨酸，58个亮氨酸，9个异亮氨酸，31个脯氨酸，33个苯丙氨酸，18个酪氨酸，1个色氨酸，22个丝氨酸，27个苏氨酸，16个胱氨酸，4个半胱氨酸，6个甲硫氨酸，25个精氨酸，16个组氨酸，58个赖氨酸，46个天门冬氨酸和80个谷氨酸。它是总共由18种、526个氨基酸构成的蛋白质，分子量约为69 000(除了这18种以外，普通的氨基酸还有一种，它就是丙氨酸)。

用上述这种符号记法，上面的血清蛋白的式子可以写成：Gly_{15} Val_{45} Leu_{58} $Ileu_{9}$ Pro_{31} Phe_{33} Tyr_{18} Try_{1} Ser_{22} Thr_{27} GyS_{32} $CySH_{4}$ Met_{6} Arg_{25} His_{16} Lys_{58} Asp_{46} Glu_{80}。应该承认，这种记法比较简单，可是哪一个字也不能省略掉。

2. 化学进化

所谓“进化”一词原来只考虑生物进化上的意义。但是，近来这个词也常用在元素的进化、星系的进化、化学进化等问题上来了，也就是用到生物进化以外的领域中去了，所以本讲中也不再特别说明了。物质由简单到复杂的变化结果是向组织化，有序化方向前进了一步，并得到了新的性质和功能。

氨基族的缩合是物质进化中分子水平上的化学进化，由简单的分子变成复杂的有机物质，即如氨基酸的合成是化学进化的第一步，而其第二步则是它再结合成巨大的分子，常常也称此为缩合变化，甘氨酸的合成就是一例，图13.4中可看到氨基酸

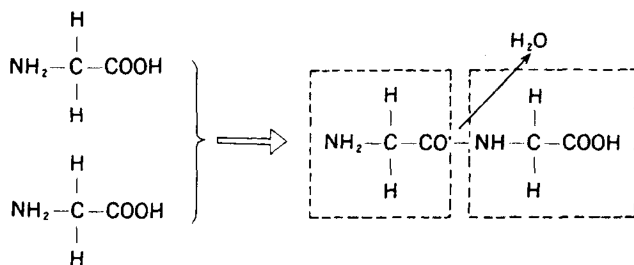


图 13.4　两个氨基酸缩合为甘氨酸

的构造，一端是胺基(-NH_2)，另一端是羧基(-COOH)，当两个氨基酸相遇，氨基中子氢和羧酸中的羟基(-OH)结合成水(H_2O)就发生了缩合反应，这样它保持了氨基酸的性质，若再和其他氨基酸相碰撞又发生脱水缩合反应，这样一个一个地链接起来就高分子化了，作为生体结构材料的蛋白质是100～500个氨基酸链接起来的(正确地说是氨基酸缩合链接)，如图13.5示例，原始地球上的蛋白质大概只包含5～7个氨基酸。

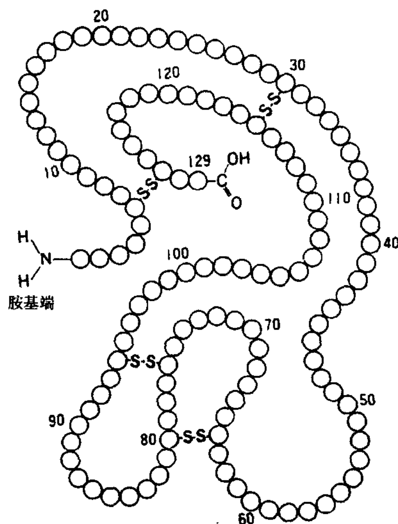


图 13.5　在多数生体细胞中某个溶菌酶的高分子蛋白质两端情况(129个氨基酸缩合而成)

高分子长链因外界刺激，而会被破坏成简单的基元，若是这样的话，进化的步伐也就是由此而开始，由化学进化进一步持续下去而产生复杂的蛋白质。不论怎样，总之，首先必须把形成的巨大分子保护下来。

前苏联的生物化学家巴林认为，巨大分子化合物是在适当温度和具有一定浓度的溶液中形成的。被称为多肽的细胞大液滴，例如在明胶（蛋白质）和阿拉伯胶相混的溶液中，该溶液为碱性时是透明的，若呈酸性，溶液形成多肽粒子而沉淀。这正好就像水蒸气凝聚成液滴一样，这样形成的多肽就把内部领域从外部环境（水溶液）中分离出来了（图 13.6）。

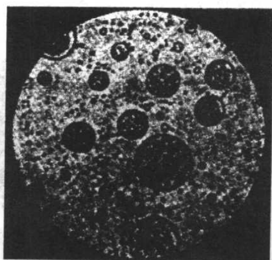


图 13.6　明胶和阿拉伯胶相混时产生多肽液滴

多肽形成时，液滴中巨大分子浓缩，与开始时溶液的浓度相比，它在浓度上要差几十倍乃至几百倍。另外，若有脂质存在于凝聚态表面时，则液滴表面就形成了膜状结构，但多肽也不是完全使之隔离的，它能通过膜与外界相互作用，这个作用重要之处就在于多肽能有选择地从溶液中抽取特定物质（某氨基酸），这样一来液滴的体积和质量都会增加，当达到某个特定的大小时就会分裂，这样就能看清楚，多肽完全是化学的作用而产生的成长之后的分裂造成，见图 13.7。

3. 生命的诞生

多肽液滴是能够独立存在和生长、分裂并且稳定的系统，由于它和外界作用后很快就能获得物质变化的能力，和化学过程慢的其他体系相比具有显著的优点。自然的一切物质中，发生发展越是快速，成长增加的液滴的比重则会变得越来越大，这正是生物学界的自然淘汰，也是符合达尔文适者生存的原则，它对原始的自然淘汰也是正确的。不论怎样，这种进化道路是极不完全的，而且越是远离它，则进行速度就越慢，当然，使之不后

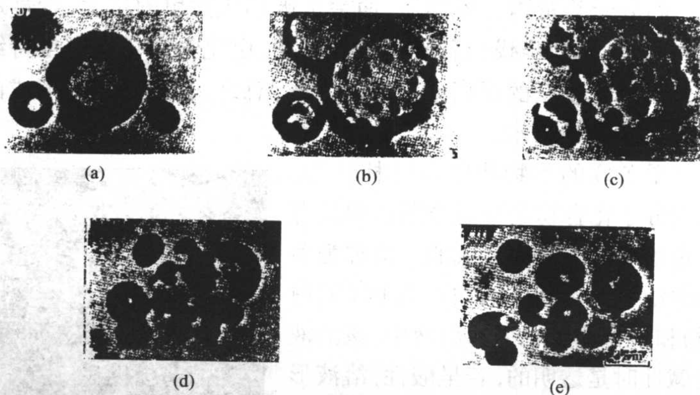
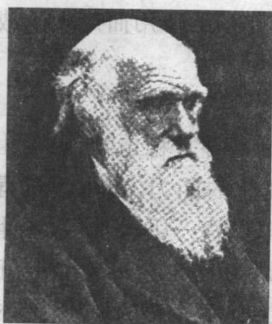


图 13.7　多肽体结构的变化

退，失败的做法也是有的。

化学进化的最终阶段是把上辈的性质正确地传给下一代子女，也就是所谓的获得了自我复制能力，而多肽不具有遗传基因，分裂时不完全，仅受上一辈性质的影响。遗传基因的实体是核酸(DNA)，DNA 分子具有双螺旋状的结构，其分子排列中就给出了遗传信息，细胞是把 DNA 上难以写出的遗传信息读取出来，决定蛋白质的氨基酸的排列，再按照它来生产蛋白质。如前已提及，现在的蛋白质是由 100～500 个氨基酸形成的，而原始的蛋白质所包含的氨基酸不会超过 5～7 个；另一方面，虽然现在的核酸是由几百万个碱基组成的，而原始的核酸可以认为充其量也只不过是由 10 个左右的碱基所构成的。这里所讲的碱基是由碳、氮、氧、氢等有规则的结合而成的，用 A、T、C、G 的记号来表示，如图 13.8 所示的是 DNA 的结构，在左、右两根主链间有 4 种碱基，它由 A-T，C-G 形成的结合对构成。两根互



达尔文(1809—1882)

补的链是 G-C, T-A 和氢的结合形成的。

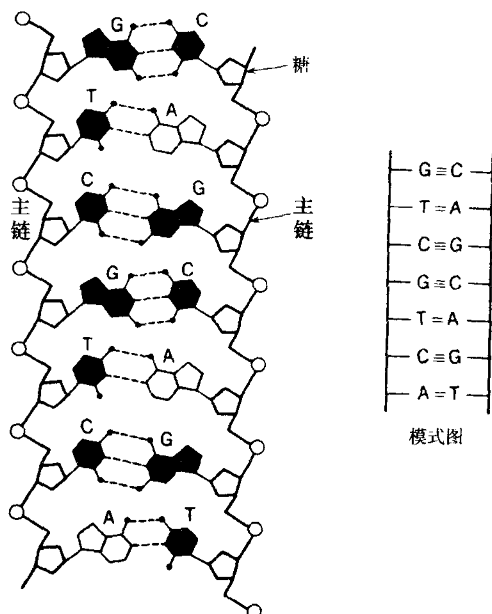


图 13.8 DNA 双重螺旋

G:鸟嘌呤;C:胞嘧啶;T:胸腺嘧啶;A:腺嘌呤

可以推理出在原始地球上存在有低分子的蛋白质和单纯的核酸。这里附带解释一下核酸,1869 年瑞士有个科学家在分解细胞蛋白质时发现其中有一个细胞核不能分解,它的性质不同于蛋白质,故取名称其为核素,二十年后人们发现这种物质是强酸,故改名核酸。应该注意的是核酸的复制是以极其高的精度进行的,若是蛋白质和核酸统一的系统能形成的话,从进化的观点来看,它能获得的极大的优越性是不错的,所以如此的系统大概是在原始的海洋中,蛋白质和核酸生成后而再形成的吧! 核酸和蛋白质是包含在以脂肪质为主要成分的膜中,且有可能存在统一的功能。这恰恰是可以被称为"生命诞生"的实现。常常把这种原始细胞称为原核细胞,其核是包裹在膜中的,不是集中

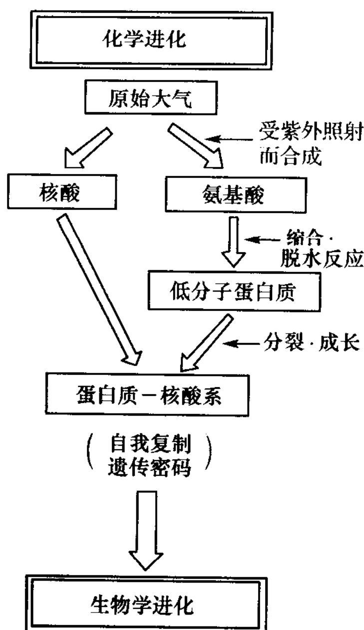


图 13.9　从化学进化到生物进化

在一起的，其结构是极为简单的；而在 20 亿～13 亿年前就具有向真核细胞进化了。这是到达生命诞生的决定性的最终阶段，实际上也是最没有弄清楚的问题。最终，在核酸和蛋白质间，产生了确定的密码关系，由此蛋白质-核酸系中就开展了以前所没有的高水平的正确的自我复制，这样就能在和不具有遗传密码的有机体的竞争中取得完全的胜利，在这种自然淘汰的过程中核酸和蛋白质在反复复杂化和改良的同时，链段在伸长，链段包含的分子产生多样化，进而达到分子排列有确定的严密的顺序，这样就由化学进化推进到生物进化了，这应是在 35 亿年前发生的事。图 13.9 显示了这一过程。

考古开发出的化石可以证实在 38 亿年前，地球上只存在有单纯 DNA 的单细胞生物，在这些原始生物中，其进化几乎是突然变异的——这也就是说各个细胞的遗传基因是突然变化的，而其他变化是没有的，对突然变异的而得的细胞，若其能保留而生存下来，就能在下一次再发生变异之前进行正确的复制，那么为什么会产生突然变异的呢？原始地球上，由于当时没有氧存在，强烈的紫外线可以直射至地面，紫外线照射原始细胞中的核酸后，就给予其能量，核酸的分子排列受到作用而变化，这就是意味着遗传信息的改变。出现如此的突然变异后，若原始细胞较之其他未能变异的细胞获得更为优越能力时，它就能驱逐其

他细胞而得繁荣；反之，若突然变异后，其性能低下，别无他法，只有死亡。这样的进化机构是强紫外线充分照射到地表时，产生频发的突然变异，应该说这是一个好的作用吧！但是，到了20亿年前时，大气中的氧的含量增加，臭氧层把紫外线挡住了，这样就已经不能再期待受紫外线照射而变异了，这就可以想像为什么最原始的细菌和蓝藻在20亿年中，也就是氧出现以来，几乎没有发生变化的原因。

由于臭氧层的遮盖，突然变异率下降了，作为取代它的手段的有性繁殖出现，生命就不再是如上面所讨论的是由单纯分裂而形成的生命体了。而是通过性繁殖，由上一辈的遗传基因通过杂交，而得到新的遗传基因传给下面的子孙，改变了原来只听任自然的突然变异的状况，而通过性生殖来产生新的组合而得遗传特征。所以，也就得到范围广泛的使个体变异的机会。

自然选择在生物进化中起了主导作用，生物为了在这场性命攸关的自然选择的危险游戏中取胜，在过去的6亿年中便如是费尽心思地做了各种各样的努力，既要子孙生得多，又要采取各种各样的做法来保护它们，特别地为了能觅食和避难，体型也变得特殊化了。而且为了能相互帮助，还开发了如何让对方尽快地来到自已庇护之下的工具。

如上所述，走向生命诞生的道路绝对不是特异的事，而是一个必然的结果，它是由极其繁多的过程交叉重叠而成的，为什么我们会成为现在的样子呢？细胞遗传基因为什么会具有现在的功能呢？诸如此类问题，若是深入研究，一定能从科学上得到说明，当然，宇宙是惟一的，用最高的方法在地球上造就了生物，可以这样说吗？

我们的进化和其他动物有区别，是不是虽经相同的优良路线，而它们的生态系统却没有得到发达的原因呢？现在我们难以回答此类问题，而在要确定我们人类是不是惟一的，最高存在的问题上，惟一要研究的是有无用类似的方法而独立生存于其他世界上的生命。

13.2 生物技术

生物技术是以现代生命科学理论为基础，结合工程学、信息学等手段在细胞或分子层次上研究或改造动物、植物、微生物等，使其具有人们所期望的品质、特性，从而为社会提供生物制品和服务的综合性技术体系。这里，值得多花一点笔墨要告诉读者的是生物学的发展是与物理学的发展紧密联系的。1680年由于列文·霍克第一次使用光学显微镜看到了酵母细胞，使生物学有了一种完全革新的工具；随着显微镜的不断改进人们发现了一个又一个危害人生命的细菌，同时也找到了战胜细菌的武器。1897年荷兰细菌学家贝杰林克发现了比细菌还小，在显微镜下看不到的很小的分子，贝杰林克称之为"滤过性病毒"。在20世纪30年代晚期出现了又一个更新的观察工具——电子显微镜。从原理上讲，用电子射线取代光线就可以达到比光学显微镜更好的效果。但是，电子显微镜虽能分辨出1/1000微米的物体，但电子显微镜的样品需放在真空里，这就要脱水，脱水又会使标本变形。像细胞这样的标本必须很薄，这样得到的影像就不是立体的，而只是平面的，再加上电子能穿过生物物质，这样得到的图像就不显眼。1944年美国的天文学家兼物理学家威廉斯和电子显微镜学家威科夫为解决这些最后的困难找到了一个精巧的办法。作为天文学家威廉斯想到在月光的斜照下山谷由于有阴影而显得轮廓分外清晰；若能使病毒产生阴影，在电子显微镜下就能看到立体的病毒了。他们用金属粒子流斜喷到显微台上的病毒颗粒上。这样，金属喷流就在病毒颗粒的后面留下空隙——留下了阴影，因而使病毒在背影上变得轮廓分明。这种方法虽然看得清晰，但仍然只能是"死"的固定的病毒。

1959年、1961年迪普伊等人又研究出了观察活细胞的方法。电子显微镜不断完善使人们能深入认识更为微观的生物世界了。

到了1982年，世界上第一台能够直接观测到物质表面的单个原子立体形貌的扫描隧道显微镜（STM）在美国的IBM公司被发明出来了。这是利用量子力学中的隧道效应的隧道穿透中，由于势垒厚度不同而使隧道穿透电流不同的原理而设计而成的。利用STM可在低温下进行人类直接操纵原子和排布原子的奇迹，也实现了单个原子的拾取和填充。这样，就进入了能进行原子级研究和观察的水平了。

1986年两位美国物理学家提出了利用原子间力的变化来观察样品表面原子形貌的设想，并研制成世界上第一台原子力显微镜（AFM），利用这些技术就可以直接观察原子和分子。现在，对DNA的研究，基因图谱研究等许多领域都成功地应用上了STM和AFM。现在，正如本讲前面所提到，许多先进的物理技术都在应用于生物学研究。因此，可以说生物学的发展是和物理学的发展紧密相关的。当然，生物技术的发展与医学、农业、畜牧业、渔业、制药业、酿酒业、食品业及环境保护等有着极为密切的关系。

生物技术可以分为传统生物技术和现代生物技术两大类。人类几千年来使用的酿酒、制酱、育种等技术是传统生物技术。近20年来，随着与生物技术相关的诸多理论和技术以及实验手段的进步，使传统生物技术的内容更加丰富，水平大大提高。同时，以基因工程、克隆技术和生物信息学等为核心的现代生物技术迅速发展壮大，并展示出巨大的科学价值和应用前景。

1. 传统生物技术

传统的生物技术可分为几大领域，它们是发酵工程、细胞工程和酶工程。

(1) 发酵工程

它是将微生物发酵和工程技术巧妙结合而形成的技术。19世纪后期，科学家发现发酵作用是微生物的生命活动引起的化学变化，不同的微生物引起不同的发酵作用，生成不同的发酵产物。发酵工程是20世纪诞生并发展成熟的技术。40年代青霉

素发酵生产技术的问世及青霉素的大规模生产，不仅为世界带来了一年产值达数百亿美元的抗生素产业，使人类的平均寿命延长了10岁，而且为人类利用微生物进行大规模生产提供了一个成功的范例。50～60年代问世的氨基酸发酵和核酸发酵是发酵工程技术进入新阶段的标志。柠檬酸、乳酸、维生素及一系列工业发酵产品相继问世，由于其强大的市场竞争力，逐渐取代了传统的化工生产。借助发酵工程，人类获得了无数美味食品和药物，提高了人类的生活质量。可以期待本世纪发酵工程在解决人类面临的粮食短缺、环境质量恶化、化石能源枯竭等问题方面将发挥重要作用。

(2) 细胞工程

细胞是生物体结构和功能的基本单位，生命活动的基本单元。细胞工程就是利用细胞的全能性，采用组织与细胞培养技术对动物、植物进行修饰，为人类提供优良品种、产品和保存珍贵物种。由于细胞多是透明的，不容易看清其中的亚结构，所以在很长一段时间里无法进一步研究细胞核和分裂的机理。后来发现，有些染料能把细胞的某些部分染上色，而其他部分却染不上，这时，情况就好转了。有种染料叫“苏木素”(得自苏木)，能把细胞核染黑，使它在细胞的背景上变得十分清晰。在柏琴和其他化学家开始制造、合成染料以后，生物学家们就有各种各样的染料可供挑选了。

1879年，德国生物学家弗莱明(Walther Flemming)发现，可以用某些红染料把细胞核内散布着的微粒状特殊物质染色。他把这种物质叫做“染色质”。他对这种物质进行观察，结果成功地看到了细胞分裂过程中的一些变化，当然，染料杀死了细胞，可是在一片组织里，他能够找到处在细胞不同分裂时期的各种细胞。弗莱明把这(一个个静止的画面)串在一起，便构成了细胞分裂过程的“电影”了。

1882年弗莱明出版了一本重要的书，详细地描述了这个过程。细胞开始分裂时，染色质聚集成线状。这时，包绕着细胞核

的薄膜似乎溶化了,同时,靠在核外面的一个小东西分开变成了两个。弗莱明把这种东西称为"星体",因为外面那些放射状的线使它像个星。这个星体分成两个星体,在细胞里向相反的方向移动。它们拖着的细丝显然和这时排在细胞中心的染色质细丝缠在一起了。星体把半数染色质拉到细胞的一侧,半数拉到另一侧。然后,细胞的中部收缩进去,把细胞分成两个。此后,每个细胞里又形成了一个核,而细胞核膜里面的染色质又碎成微粒状。(图 13.10)

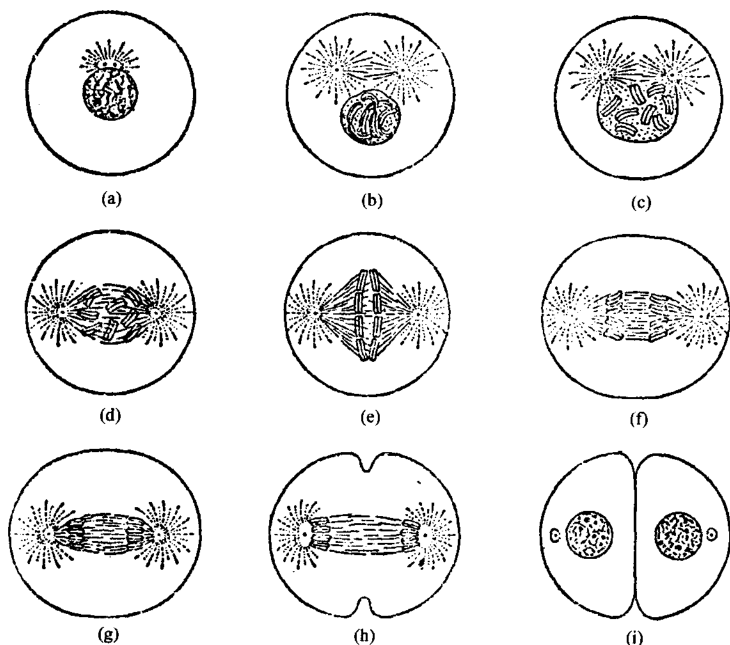


图 13.10 细胞的有丝分裂

弗莱明把这种细胞分裂过程叫做"有丝分裂",因为染色质丝在其中起了重大作用。1888 年,德国解剖学家瓦尔德尔(Wilhelm von Waldeyer)给染色质丝起了"染色体"这个名字,后来就这样叫下来了。可是应该记住,尽管它叫做染色体,但在不

染色的时候，它的本来面目是无色的，所以当然也很难把它同和它很相似的无色背景分辨开来。（虽然如此，德国的业余植物学家霍夫迈斯特（Wilhelm Fredrich Benedict Hofemeister）仍然早在1848年就隐隐约约地看到了花细胞的染色体。）

人们不断观察染色的细胞，发现了每种动植物的细胞里都有特定数目的染色体。在细胞通过有丝分裂分成两个之前，染色体的数目先增加一倍，因而在分裂之后，两个子细胞里染色体的数目就和原来的母细胞一样多。

细胞工程主要包括体细胞融合、细胞核移植，细胞器摄取和染色体片段重组等。例如，体细胞融合是将两个不同种类的细胞加上融合剂，在一定条件下，彼此融合成杂交细胞，使来自两个亲本细胞的基因有可能都被表达，这就打破了远缘生物不能杂交的屏障，提供了创造新物种的可能性。事实上，利用体细胞融合技术，已经成功实现了小鼠和田鼠、小鼠和小鸡等许多远缘动物的体细胞杂交。植物细胞工程是一项大有潜力的新兴学科，是“绿色革命”的一个重要方面。面对21世纪的挑战，科学家们正在试图通过细胞诱变或转基因等方法，培育抗病高产的新型作物。

(3) 酶工程

酶是一种在生物体内具有新陈代谢催化剂作用的蛋白质。酶工程是利用酶催化的作用，在一定的生物反应器中，将相应的原料转化成所需要的产品。酶工程主要用于食品工业、轻工业和医药工业。例如，肉类的嫩化，改善食品的色、香、味等。日常生活中见到的加酶洗衣粉、嫩肉粉就是酶工程的直接体现。

2. 现代生物技术

1953年美国的沃森和英国的克里克提出了DNA分子的双螺旋结构模型，开创了分子生物学研究的新纪元。经过20多年的研究和探索，分子生物学在70年代初期取得重大突破，产生了一门全新的学科——基因工程学。基因工程是20世纪生命科学研究中最伟大的成就，它的出现将现代生命科学研究推向

了一个崭新的时代。基因工程技术无论是在基础理论研究，还是在实际应用方面都有重大贡献，由于在基因工程方面做出杰出贡献而获得诺贝尔奖的科学家就有10多人。基因工程是现代生物技术的核心组成部分，以下将简要介绍基因工程和生物克隆技术。

(1) 基因工程

基因工程又称DNA重组技术，是将生物体特定的基因按照人的意愿经过体外重组后再转入生物体内，使这个基因能在受体生物体内复制、转录、翻译、表达，从而产生出人们所期望的产物或达到某种目的。关于基因的概念，这里作些介绍。19世纪60年代有一个奥地利神父名叫孟德尔(Grogor Johann Mendel)，他因为修道院里的事情太忙而没有注意到当时的生物学家都热衷于研究细胞分裂，所以他一直在他的花园里安安静静地做一些实验，没想到这些实验最终却弄清了染色体的意义。孟德尔神父是个业余的植物学家，他对具有不同特征的豌豆的杂交结果特别感兴趣。他很走运，每一次都凭直觉研究了一种清楚可辨的特征。

他用豆色不同(绿色的和黄色的)、豆皮光滑程度不同或植株高矮不同的豌豆进行杂交，观察下一代植株的结果。孟德尔对他实验的结果仔细地进行统计记录。他的结论主要可归纳如下：

① 每一种特征是由某些"因素"控制着。这些因素(在孟德尔所研究过的事例中)可以是一种或两种。例如，关于种子颜色的一种因素将使种子成为绿色；另一种因素则使它成为黄色。[为了方便起见，我们还是使用现代的名词吧！这里说的因素现在称为基因。基因这个词是丹麦生物学家约翰逊(Wilhelm Ludwig Johannsen)在1909年提出的。控制同一个特征的不同基因叫做"等位基因"。这样，种子颜色的基因有两个等位基因，一个是使种子成绿色的，另一个是使它成黄色的。]

② 每一个植株的每一个特征都由一对基因来控制，其中从

父本和母本各传来一个。这个植株又把每一对当中的一个传给一个种细胞。所以,当两株植物的种细胞授粉结合以后,这个后代就又有了控制这个特征的两个基因。这两个基因可以是相同的,也可以是不同的等位基因。

③ 当双亲各传给子代一个等位基因时,其中的一个等位基因,可能会压制另一个的作用。例如,如果产黄种子的植株和产绿种子的植株杂交,所有的第二代都会产黄种子。种子颜色基因当中的黄色等位基因是"显性基因",而绿色等位基因则是"隐性基因"。

④ 可是,隐性等位基因并没有被消灭。上面所说的那个绿色基因虽然没有产生可以看到的后果,可是它仍然存在。如果两株彼此都含有混合基因(即每株都含有一个绿色和一个黄色的等位基因)的植物杂交,有的后代在受精卵里就可能含有两个绿色等位基因;这种后代就会产生绿色的种子,而且这种后代互相授粉再产生出的后代也要产生绿色的种子。孟德尔指出,从杂种的双亲(即含有一个黄的和一个绿的等位基因)来的等位基因有四种可能的组合方式:从父本来的黄色等位基因和从母本来的黄色组合;从父本来的黄色等位基因和从母本来的黄色组合;从父本来的绿色基因和从母本来的黄色组合;从父本来的绿色基因和从母本来的绿色组合。在这四种组合中,只有最后一种造成的植株会产生绿色的种子。假定这四种组合的机会都相等,新一代的植株便有 1/4 应该产生绿色的种子。孟德尔发现,事情确实就是如此。

⑤ 孟德尔还发现,不同的特征(例如种子的颜色和花的颜色)是互不相关、各不遗传的。这就是说,红花既能产生黄色种子,也能产生绿色种子。白花也是这样。

孟德尔是在 19 世纪 60 年代初期做这些实验的,他很仔细地把结果写了出来,抄了一份寄给瑞士的著名植物学家内格利(Karl Wilhelm von Nägeli)。但是,内格利对此不以为然。内格利很明显地爱好那种包罗万象的理论(他自己的理论就显得有

些玄虚、浮夸)，他认为只数数豌豆对了解真理没有什么用处。再说，孟德尔只不过是个不知名的业余爱好者！

孟德尔显然让内格利弄得灰心丧气了，因而他就转到他修道院的职守上去，不再做他的研究了，发了胖(胖到园地里都弯不下身子)。不过，他还是在1866年把他的文章发表在一个奥地利的地方性杂志上，他的文章在一代人的时间内并没有引起人们的注意。

但是，其他科学工作者虽然不知道孟德尔，却也逐渐得出了和他相同的结论。他们对遗传发生兴趣的原因之一，是他们想研究"突变型"。突变型指的是畸形的动物或怪物，人们通常都认为这些畸形动物是种不祥之兆。1791年，美国马萨诸塞州有个农民名叫赖特(Seth Wright)，他对他羊群中的一只畸形羊采取了比较现实的态度。有只羊生来腿特别短，对于这位精明的美国人来说，短腿的羊意味着有无法越过他农庄的石头短墙逃出的好处。所以他就对他那个不算不幸运的意外事件仔细盘算，并培育了一种短腿羊。

这个现实的事例使其他人找起有用的突变型来了。到19世纪末，美国园艺家伯班克(Luther Burbank)已成功地培育了好几百个新的植物品种，它们总是有某一方面改良得比老的品种好。这不止是靠突变，也靠精巧的杂交和嫁接。

这时，植物学家也想给突变找出个解释。可能是科学史上最奇怪的巧合吧，至少有三个人在同一年各自得出了一个和孟德尔在一代人以前所得出的完全相同的结论。他们是荷兰的德弗里斯(Hugo de Vries)，德国的柯伦斯(Karl Erich Correns)和奥地利的丘歇马克(Erich von Tschermak)。他们每个人都既不知道另两个人的工作，也不知道孟德尔的工作。1900年三个人都准备好了要发表他们的工作。三个人都最后去查阅过去这方面的文章，并且都十分意外地看到了孟德尔的文章。三个人的工作都在1900年发表了，每个人都提到孟德尔的文章，并且都把发现的荣誉让给孟德尔，而把自己的工作说成只是证实而已。

不少生物学家马上就看出孟德尔的基因和显微镜下看到的染色体之间有联系。最早提出两者相似的是美国的细胞学家萨顿(Walter S. Sutton)，那是在 1904 年。他指出，染色体和基因一样，是成对存在的，一个来自父本，一个来自母本。这种比拟的惟一麻烦，就是每一种生物的细胞里染色体的数目远远少于遗传特征的数目。例如，人只有 23 对染色体，可是却显然具有上千上万种遗传特征。所以，生物学家就不得不作出结论说，染色体不是基因。每个染色体必然是许多基因的集合。

生物学家们很快就发现了研究特定基因的一个绝妙的工具。它不是个物理仪器，而是一种新的实验动物。最初对孟德尔学说持怀疑态度的哥伦比亚大学动物学家摩尔根(Thomas Hunt Morgan)，在 1906 年想到用果蝇(drosophila melanogaster)来研究遗传。("遗传学"这个词是英国生物学家巴特森(William Bateson)在 1902 年创用的。)

对于研究基因遗传来说，果蝇比豌豆或其他一般实验动物都有显而易见的优点。果蝇很快就产很多卵；用很少一点食物就能养一大群，它还有几十个容易观察的遗传特征；而且由比较简单的染色体组成——每个细胞里只有四对染色体。

摩尔根和他的同事在果蝇上发现了性别遗传机理的一个重要事实。他们发现，雌果蝇有 4 对完全成对的染色体，每个卵细胞都从每一对里得到一个染色体。所以就染色体组成看来，所有的卵都是一样的。可是雄果蝇的四对染色体里，有一对是由一个正常的染色体(称为"X 染色体")和一个短的染色体(称为"Y 染色体")组成的。所以，在形成精子细胞时，半数精子具有 X 染色体，另一半具有 Y 染色体。如果有 X 染色体的精子使卵受精，有四对完全的染色体的受精卵自然就发育成雌的。相反，有 Y 染色体的精子就产生雄性。因为这两种情况的机会相等，所以在典型的生物种中，雌雄的数目大体相等。(某些生物，特别是一些鸟，雌性具有 Y 染色体。)

这种染色体的差别能说明为什么有些病或突变型只发生在

雄性。如果一个有缺陷的基因是出现在一对X染色体里,而这一对基因里的另一个还能是正常的,那么,这个缺陷就被补救了。但是,如果雄性的X染色体有缺陷,和它配对的Y染色体一般是不能补求它的,因为Y染色体里只带有很少的基因。所以,缺陷就表现出来了。

这种"伴性疾病"的最著名的例子就是"血友病"。这是一种血液不大容易凝固的病(不是完全不凝固)。血友病的患者老是有因为受到轻微损伤而出血死亡的危险,或遭受体内出血带来的痛苦的威胁。如果一个妇女在她的一个X染色体上有一个能造成血友病的基因,那么,在她另一个X染色体相同位置上的基因很可能是正常的。所以,她就表现不出病来。可是她是个"携带者"。她所产生的卵细胞,半数具有正常的X染色体,半数具有血友病X染色体。X染色体上有毛病的那个卵子,如果由一个正常男子的带有正常X染色体的精子受精,结果发育成的就是个女孩,她虽然不是血友病患者,可是还是个携带者。如果这个卵子由一个正常男性的带有Y染色体的精子受精,Y染色体里就没有什么能对抗卵子内的那个血友病基因,结果就是个患血友病的男孩。从几率来说,血友病携带者的儿子,半数是血友病患者;女儿有半数是携带者。

历史上最著名的血友病携带者是英国的维多利亚女皇。她有四个儿子,最大的里奥波德有血友病。爱德华七世逃脱了(后来英国皇室就是从他传下来的),所以现在的英国皇室就没有了血友病。可是维多利亚有两个女儿是携带者。她有个女儿的女儿(也是携带者)和帝俄沙皇尼古拉二世结了婚。他们的独子是个血友病患者;这对俄国和世界的历史都有影响,因为拉普丁(Gregory Rasputin)神父通过影响这个血友病患者在俄国掌权,引起了群众的不满,最后导致了革命。维多利亚的另一个女儿的女儿(也是个携带者),嫁到西班牙皇室,在那里造成了血友病。因为在西班牙的巴本(Bourbon)家族中和俄国的罗曼诺夫(Romanoff)家族中出现了血友病,所以人们曾把这种病叫做"皇

族病”,可是除了维多利亚本人是携带者以外,它和皇族没有特别的关系。

色盲是比较轻的伴性遗传病,男病人比女病人多得多。事实上,男人由于少一个X染色体,所以可能虚弱些;妇女如果能免于生孩子时的感染,平均比男人多活3到7年,也许就是这个缘故。正是这样,23对完整的染色体使妇女成为比较健全的生物体。

基因工程是现代基因理论一个具体的应用。例如,要获得一种抗虫的农作物,就要先分离到一段基因,这个基因编码有某种专门杀虫的毒蛋白。然后将这个基因放在一个载体上,通过载体将这段基因转到农作物植株细胞的DNA上去(这个过程称为DNA整合)。这样,在这些转入了基因的农作物细胞中就能产生杀虫的蛋白,虫子一吃就会被杀死。这种能杀虫的特性可以随着DNA的复制而传给后代。基因工程技术使人们可以克服物种之间的遗传屏障,按照人的愿望创造出自然界里没有的新的生命形态或稀有物种,以满足人类的需求。目前,基因工程已在转基因动物、基因工程药物和转基因食品等方面有所应用。

① 转基因动物。采用DNA重组技术将特定的外源基因导入动物染色体,使其发生整合并能遗传、产生出新的动物个体或品系。利用这种动物可以“生产”人类所需的药物。例如,某些药物无法或极难用人工合成的方法来获得,只能从生物体中得到。像血友病人缺少的Ⅷ因子,目前只能从志愿献血者的血中分离。但是,如果将编码该因子的基因,通过分子生物学手段加以改造,使之能在乳腺细胞内表达,然后将这个经过改造的人的基因,用显微注射法注入羊的受精卵的细胞核内,待其发育成胚胎后,再把它移入代理母羊的子宫内,这样就可以得到带有人基因的转基因羊。由于该基因经过了改造,它只在乳腺细胞内表达,所以当这头小羊长大并能泌乳时,它的乳汁中便带有Ⅷ因子,其含量可远远高于人血中的含量,可以容易地分离得到。通

过这种方式得到的药物目前在国外已经上市。

② 基因工程药物。人们已经知道，生物体的发育最终是由基因控制的，不同的基因控制产生不同的蛋白质。利用基因工程技术可以把产生某种人们需要的蛋白质的基因(称为目的基因)，从细胞中分离出来，使它在一定条件下合成所需要的蛋白质，这些蛋白质就是基因工程药物。目前使用的方法主要是经过一系列包括剪切、拼接等操作手段，把目的基因重新整合到某种特定细胞中，使其高效、持续地产生大量需要的蛋白质。以前这种由生物体产生的蛋白质类药物，都是直接从动物或人尸体中提取的。它们在生物体内含量极少，提取物来源又十分困难，例如，从 100 公斤的猪胰腺中只能提取 3～4 克胰岛素。这样，一是成本高，多数人用不起；二是从动物中提取的异构体蛋白质有副作用，安全性不够。事实上，基因工程技术最早的运用就是在医药上。1977 年美国科学家首次用大肠杆菌生产出有活性的人脑激素——生长激素释放抑制素。这种激素能控制生长素、胰岛素和胰岛血糖素的分泌，可用于治疗肢端肥大症和急性胰腺炎等疾病。这是基因工程史上的一个重大突破，其巨大的经济价值也十分诱人。据统计，目前美国上市的基因工程药物共 47 种，还有 100 多种基因工程药物正处于研究阶段。日本已有 20 多种基因工程药物投放市场。我国对基因工程药物研究也给予了足够的重视，已批准乙肝疫苗、干扰素等约 10 种基因工程药物投放市场。

③ 转基因食品。近年，转基因技术在农业和食品业中被大量使用。用转基因作物制成的食品在餐桌上出现的频率日渐增大，人们称之为转基因食品。目前已商品化的转基因作物，集中在种植面积比较大的作物上，如：大豆、玉米、油菜、棉花、小麦等，以及西红柿、土豆、笋瓜、甜瓜、生菜等蔬菜。根据 1999 年的调查，全世界 40％的转基因玉米和 50％的转基因大豆种植在美国，转基因作物的种植面积占了全美耕地面积的 40％，达 2320 万公顷。2000 年，世界大豆、棉花、油菜和玉米 4 种主要转基因

作物总面积已达4420万公顷，占总种植面积的16%。在阿根廷，70%的大豆是转基因大豆。我国也种植了较大面积的转基因作物，主要是棉花。转基因作物一般比传统品种高产，且具有“天生”的抗旱、抗病虫害、抗除草剂等能力，生产者投入减少，而收益却大大提高。但是，转基因作物对环境的影响，以及转基因食品的安全性是近年备受关注的问题。尤其在欧洲，疯牛病、疯羊病等早已令欧洲人对食品安全风声鹤唳，任何关于转基因食品安全的争论都让他们闻风生畏，并影响了对转基因食品的态度。例如，欧盟市场以安全为由禁止进口美国的转基因玉米。

(2) 生物克隆技术

克隆是英文clone的音译，其动词含义是无性繁殖。克隆也是一系列技术的总称，按照克隆对象和操作层次的不同，可以分为分子克隆(基因克隆)、细胞克隆以及个体水平上的克隆(如：微生物克隆、植物克隆、动物克隆)等，最基础的是分子克隆，也称做基因的无性繁殖。克隆既是一个生物学上的概念，也是一种生物学技术。克隆作为一个概念，随生物学发展被赋予了新的含义。但是，要提醒大家的是不能把复制、仿造等概念都冠上“克隆”之名，否则，就要概念上混淆了。

人们一直认为，只有植物细胞具有“全能性”，即任何一个植物单细胞都可发育、分化出完整的个体，也就是可以无性繁殖。动物细胞，如哺乳类动物的体细胞则不具有这种全能性，动物个体必须经过雌雄交配，雄性个体的精子(精细胞)和雌性个体的卵子(卵细胞)结合后，才可能发育分化出完整的个体，也就是必须要经过有性繁殖。除了精细胞和卵细胞结合形成的合子，动物其他的体细胞，都没有独立发育成动物个体的能力，也就是不能无性繁殖。

那么，分化后的动物细胞能否恢复“全能性”呢？为了回答这个问题，德国胚胎学家施培曼(H. Spemann)于1938年提出了将分化的细胞核移植到卵细胞的设想。

1952年，布里格斯(R. W. Briggs)和金(T. J. King)建立了两

栖类的核移植技术后，使施培曼的设想得以实现。他们用紫外线照射蛙卵，使其遗传物质失活，然后用玻璃微管将蛙胚胎细胞核注射到卵内，构建重组胚，并得到了由重组胚发育而成的蝌蚪和蛙，即克隆蛙。这是人类最早克隆的动物。这表明蛙的已分化细胞的细胞核在移植到卵母细胞后，可以恢复"全能性"。

哺乳动物的核移植研究始于1969年，在早期沿用了两栖类核移植方法。由于哺乳动物卵细胞很小，胚胎在体内发育，操作和观察不便，哺乳动物的核移植十分困难。但科学家借助显微操作仪坚持实验。1977年，霍皮(Hoppe)通过核移植技术将小鼠受精卵的一个原核去掉，设法使染色体加倍，得到了遗传上完全纯合的小鼠。80年代初，伊尔曼泽(Illmensee)和霍皮又通过核移植技术，得到了由早期胚胎细胞和早期孤雌生殖胚胎细胞发育而成的小鼠。由于实验不能重复，他们的结果受到广泛质疑。然而，他们的结果引起了科学家极大的兴趣，促使更多的人投身于核移植研究。1983年，麦格拉斯(McGrath)和索尔特(Solter)在技术上取得突破，建立了实用的哺乳动物核移植技术。像两栖类的核移植一样，哺乳动物核移植在去核和移核时，移核针必须刺破细胞膜。由于穿刺损伤，构建的重组胚很难存活。麦格拉斯和索尔特巧妙地解决了这个问题，他们对卵细胞去核时，将细胞核连同少量细胞质和细胞膜一同吸入去核针内，然后拉动去核针将细胞核"拧"下来，防止细胞膜破裂；移核时他们将供核细胞与去核卵母细胞紧密接触，使二者融合，这样构建的重组胚存活率很高。



克隆羊多利

此后，科学家先后将鼠、兔、羊、牛、猪和马等动物的早期胚胎细胞

培育成了新个体，并试图用分化程度更高的细胞克隆动物，但均未成功。1996年，苏格兰罗斯林研究所的科学家维尔穆特用血清饥饿法处理体外培养的绵羊细胞，使其停止分裂，处于休止状态（G_0期），再使它与去核卵母细胞融合。由于G_0期细胞核与去核卵母细胞的相容性较好，核移植较易成功。维尔穆特用此技术，将分化程度很高的绵羊胎儿成纤维细胞和成体母羊乳腺细胞克隆成了新的个体，其中用乳腺细胞克隆的绵羊即是"多利"。这是克隆技术发展史上的一次飞跃。最近，克隆技术又有重大进展，美国、英国、意大利等国研究人员以不同动物的体细胞借代孕母体克隆成个体，并繁衍后代。日本用成年体细胞克隆了8头牛，成功率很高。我国利用转基因山羊胎儿体细胞成功地克隆了山羊，成功率是克隆羊"多利"的10～20倍。此外，为了医疗目的，研究人员正在利用克隆技术培育出能够发育成人体所有细胞的"干细胞"。干细胞是未成熟细胞，具有再生人体各种组织器官的功能，医学界称之为"万能细胞"。利用人体干细胞，有可能在体外培育出与提供细胞的病人遗传特征完全相同的细胞、组织或器官，如骨髓、脑细胞、心肌、肝、肾等，它们可被用于治疗白血病、帕金森氏症、心脏病和器官衰竭等疾病。目前，我国研究人员已利用干细胞技术克隆出人体组织，并将开展人体器官克隆计划。如果进展顺利，几年后就可以克隆出能够实用的人体器官，以替代人体受损的器官。最近，传来了"多利"死去的消息，这又给人们提出了一个新的课题，克隆生物的发育、生长上存在天生的缺陷，也是值得探讨的。

总之，克隆技术并不是一蹴而就的，它已是几代科学家努力的结晶了，今后克隆技术的每一次突破，都还需要许多大大小小的改进和提高的积累才能完善。

13.3 "Bio-x"的介绍

"Bio-x"的说法源于朱棣文教授，Bio-x计划之所以进展顺

利，部分原因是有越来越多的人认同这样一点，即若想更多地了解复杂的生物系统，需要有更多的物理学家的参与。分子生物学中的相当部分有赖于物理学家提供的实验技术，如核磁共振和 X 射线衍射技术等，并且随着生物学数据库中数据量的日增，对数据的分析和计算方法的需求都迫切需要物理学的支持。

同样，物理学家也在生物学中找到许多新课题，例如，因激光冷却捕获原子而获得诺贝尔奖的朱棣文现正致力于单个蛋白质分子行为的研究。寻求不同学科科学家合作的动力也基于这样的认识，传统的单一学科研究已成为未来科学发展的障碍，这也是普林斯顿大学新研究所问世的部分原因。普林斯顿的这家机构共筹划 2 年，并从物理学、化学、工程以及生物学中抽调了 12 名资深教授筹划。研究所负责人、发育生物学家谢利·蒂夫曼称研究所的工作重点将是所谓的"集成生物学"，即集成各种有助于了解复杂的生命过程的信息——如细胞或基因间的作用信息等。蒂夫曼说，生物学在上世纪后半个世纪里取得了长足进展，这得益于对生物体各个组成部分的深入了解并对此作出鉴别。但是现在越来越多的生物学家意识到，该是改变这种传统研究方式的时候了，应将重点放在研究这些不同的生物部分是怎样相互作用以形成复杂的生物系统。

因此，"Bio-x"研究中一大领域是基础理论的深入研究，这个研究是综合的，学科渗透的，而且是需要科学家们协同作战的，如：

1. 人类基因组计划

人体是一个多细胞体系，每个细胞中都含 46 条两两配对的染色体，每 23 条染色体构成一个染色体组。DNA 是染色体的主要成分，每个染色体组的 DNA，就构成一个基因组(genome)。据早先的估计，人类基因组中约有 10 万个基因。每个基因都由数万个碱基对组成，按顺序排列成 DNA 链。通过数十年的人类遗传学研究，人们已搞清了 1.6 万个基因在染色体上的位置。但是，对整个基因组所包含的 10 万个基因而言，这只是一小部

分。

1985年,美国能源部(DOE)提出,要将共包含约30亿碱基对的人类基因组全部碱基序列分析清楚。1986年,美国宣布启动"人类基因组启动计划";1989年,美国国家卫生研究院(NIH)建立国家人类基因组研究中心;1990年,NIH和DOE联合提出美国"人类基因组计划",计划从1990年10月1日起,到2005年9月30日止,耗资30亿美元。

人类基因组计划的目的就是要找出人体所有基因碱基对在DNA链上的准确位置,弄清各个基因的功能,对它们进行编目,最终绘制出包含人体全部遗传密码的图谱。这一计划的科学意义重大,将推动整个生命科学的发展。它的实施,必将揭示冠心病、高血压、糖尿病、癌症、精神病、自身免疫性疾病等基因病的病因,找到致病基因或易感基因,并建立各种疾病的诊断的治疗方法,从而为保护人类的健康做出贡献。由于人类基因组计划的重要性,从一开始就是个国际合作计划,有6个国家的16个中心共上千名科学家参加。其中美国占54%的份额,英国33%,日本7%,法国3%,德国2%,中国1%。我国的人类基因组计划于1993年启动。

由于潜在的商业利润惊人,破译人类基因组的队伍逐渐出现两大阵营:一是由官方资助的主流科学家,通称"人类基因组计划";另一方是私人公司,美国塞莱拉公司是其主要代表。为了抢在私营公司之前破译人类基因组,"人类基因组计划"加快了工作进度。1999年底由英、美、日、中等国家组成的分研究小组已破译了人体第22对染色体的密码。2000年4月美国科学家宣布绘制出了人类第5对、第16对和第19对染色体的基因草图。5月8日,德、日科学家宣布破译了人体第21对染色体基因密码。第21对染色体是人体23对染色体中最小的一对,它与许多遗传性疾病有直接联系,如多种类型肿瘤、耳聋、忧郁狂躁症。在它的14个序列的基因中,任何一个基因突变都会导致严重的疾病,如老年痴呆症、癫痫、白血病等。

与此同时，破译其他物种基因的工作也是如火如荼地展开。例如，2000年3月美国塞莱拉基因组公司宣布绘制出果蝇的完整基因图；4月，法国巴斯德研究所宣布，引起人体严重食物中毒的单核细胞李氏杆菌的基因组已被完全破译，它为人类最终征服李氏杆菌提供了重要手段；6月初，塞莱拉公司宣称已破译出1/3的鼠遗传密码。

2001年2月12日，中、美、日、德、法、英等6国科学家和美国塞莱拉公司联合宣布了人类基因组图谱分析结果：人类基因组由32亿个碱基对组成，共有3万至3.5万个基因，远小于早先估计的10万基因。这个项目的完成，使21世纪生命科学将获一个非常宝贵的资源库，标志人类在研究自身过程中具有里程碑式的重大成就，并将促进生物学不同领域的发展与革命。此前，美国著名的《科学》杂志将人类基因组草图的全部测序工作列为2000年十大基础科研成就的第一条。

最近测得的基因数目

人	3万～3.5万（原来预想在10万～15万）
猩猩蝇	1.4万
线虫	1.9万
河豚	3万
稻	3万
大肠杆菌	4000
结核菌	4000
酵母	6000

2. 生物信息学

20世纪70年代，由于生物大分子（核酸和氨基酸等）序列和蛋白质晶体结构测定的需要，一批计算机科学家与数学家加盟分子生物学研究，帮助分子生物学家收集、存储、管理和处理测定的数据。到20世纪80年代中叶，这类工作已初具规模，人们称之为计算分子生物学。

20世纪90年代初，人类基因组计划启动。按照设想，科学家分析碱基对如何组成基因以及各种基因有何功用，弄清全部

基因的位置、结构和功能，为人类征服多种疑难病铺平道路。如此庞大而复杂的生物信息资源，是在几十亿年的生物进化历程中形成的，它的价值远远超过地球上任何矿藏的价值。于是，各种各样的“淘金者”蜂拥而上，企图挖掘这个“含金量”极高的宝藏。这种巨大的驱动力，促使形成了旨在收集、加工、储存、检索、传播、分析、处理、利用和开发这些巨型信息资源的生物信息学。

人类基因组计划的重要目的是要揭示人类疾病的遗传基础。过去的100年中，人们依靠经验、化学方法和药理学研究，发现了400多个药疗目标，包括免疫调节、胃肠功能、炎症、肾与心肌功能等。药物工业针对这些目标制造和筛选了许多分子，用于缓解和治疗疾病。现在的生物信息资源，特别是基因组的信息资源，为药物目标的发现提供了难得的机遇。据估计，将会发现3000～10000个药物目标，其市场前景是非常广阔的。

传统的药物发现周期长，通常要10～12年，耗资也很大，平均为1亿～3亿美元。由于生物信息学的发展，其周期和耗资已明显下降，据估计已下降了1/3。生物信息学在药物发现的各个阶段，如初步研究、目标鉴定、目标甄别、筛选和合理设计，都扮演着十分重要的角色。生物信息学已经成为一种强有力的药物开发工具。从目前美国、欧洲和日本的发展态势看，生物信息学已成为崭新的生物工程、医药产业和高科技农业的巨大推动力。科学家预言，当今的生物科学与信息科学相结合，将会产生前所未有的飞跃。

3. 理论生物学

对于理论生物学的发展，这里需要再回顾一下DNA结构的发现过程。1953年沃森和克里克发现了脱氧核糖核酸(DNA)的双螺旋结构，为在分子水平上描绘生命的蓝图奠定了基础，这是因为DNA双螺旋结构大大有助于人们理解DNA的自我复制、发育与功能以及突变。双螺旋结构所提供的生命蓝图，不仅为生命科学的发展提供了光明的前景，而且也对哲学的

思考产生了深远的影响。

有三项重要的工作是双螺旋结构发现的前导：一是加州理工学院的鲍林（1901—1994）发现了蛋白质的 α 螺旋结构；二是伦敦帝国学院的威尔斯和弗兰克林（1920—1958）成功地获得了一些 DNA 的 X 射线衍射图；三是查伽夫发现了嘌呤（A，G）与嘧啶（T，C）的等分子数关系。由于各方面的努力，当时已经确知，DNA 的成分是糖、磷酸盐和 4 种碱基，这三种成分先结合成核苷酸，核苷酸连接成长链，长链呈现螺旋状。剩下要解决的是所有细节问题，如：共有几条螺旋？不同碱基在螺旋上如何排列？碱基是在螺旋之内还是外侧？由于 DNA 是大分子，结构复杂，沃森和克里克经过 18 个月的努力终于构造出正确的模型——异类碱基配对（A 和 T 配对，C 和 G 配对）的螺旋模型：两条由糖和磷酸搭成的右螺旋相对着，碱基对横在中间，像一具螺旋梯子。他们的这一研究成果，以《核酸的分子结构——DNA 的结构》为题，在 1953 年 4 月的英国《自然》杂志上发表。RNA 分子的结构与 DNA 类似，也是双螺旋形的，所不同的是其核苷酸组分中，核糖取代了脱氧核糖，尿嘧啶 U 取代了胸腺嘧啶 T。

双螺旋模型很好地解释了生物学中两个最重要的问题：细胞的复制与蛋白质的合成。细胞分裂时，一个分为两个，而且新细胞和原来的母细胞完全一样。对此，双螺旋模型的解释是，在细胞分裂过程中，DNA 中连接碱基的氢键断裂，双股螺旋分成两股，露出碱基，然后每一股作为复制的模板，按互补配对的原则制造出另一股，最后得到两条新的 DNA 分子，和原来的 DNA 分子一模一样。两个新的 DNA 分子中，各有一股是原来的，因此这个过程称为半保留复制。关于蛋白质如何根据 DNA 的遗传指令合成，又可分成两个问题：一是遗传指令是怎样储存在 DNA 分子上的，二是遗传信息“转译”成蛋白质分子的机制。

由于每个 DNA 分子的糖—磷酸骨架都是完全一样的，不含任何特殊的信息，因此遗传信息一定储存在碱基里，由碱基的排列给出遗传信息。蛋白质里一共有 20 种氨基酸，但是碱基只

有 4 种，因此遗传密码一定是由几个碱基（相当于字母）组成一个密码子（相当于字）以和蛋白质对应。究竟是几个碱基呢？物理学家伽莫夫解决了这个问题。他从数学上考虑：如果只由两个碱基组成一个密码，那么总的排列方法只有 $4^2=16$ 种，不足以对应 20 种氨基酸。4 个碱基排列方法有 $4^4=256$ 种，太多了，大自然不会这样浪费。因此，应当是由 3 个相邻的碱基组成一个三联体密码子。这时共有 $4^3=64$ 种排列方法，与 20 种氨基酸相对应，有些密码是简并的，即几种排列方法对应于一个氨基酸。对应实验证实了三联体密码子假说。经过许多科学家十余年的努力，通过蛋白质人工合成实验，已经破译出全部遗传密码。遗传密码是普适的，对任何生物都一样。遗传密码表可以用 DNA 中碱基排列与氨基酸的对应关系来表示，也可以用 RNA 中碱基排列与氨基酸的对应关系表示，二者的区别是 RNA 中没有胸腺嘧啶 T，而是由尿嘧啶 U 代替。

DNA 并不直接制造蛋白质，而是先把密码信息复制到 RNA 分子上（即“转录”），RNA 再用这个信息制造蛋白质（即“翻译”）。美籍西班牙生物化学家奥乔亚由于对基因内遗传信息通过 RNA 中间体翻译成蛋白质的过程的研究而荣获 1959 年度诺贝尔生理学（或医学）奖。1958 年克里克总结了细胞中遗传信息传递的“中心法则”：遗传信息是由 DNA 转移给 RNA 再转给蛋白质的。它包括 DNA 的自我复制及其信息的转录和翻译。自我复制是一种包括解旋和碱基配对同时进行的过程，利用细胞提供的能量并且在解旋酶的作用下，DNA 分裂成两条单链的同时按照碱基互补配对原则，每条单链都作为模板合成出子代双链，并且不断地延伸而形成两个新的 DNA 分子。在复制过程中，互补链上的碱基与模板链上的碱基是一一对应的，例如，

模板链上的碱基排列顺序……GTAACTTG……

互补链上的碱基排列顺序……CATTGAAC……

“转录”和“翻译”都是通过 RNA 实现的。转录是在细胞核内由信使 RNA 完成的，而翻译则是在细胞质内由转移 RNA 完成

的。所谓转录，就是以 DNA 分子的一条单链为模板，与一条互补的 RNA 分子单链装配成一条新的双链 RNA 分子。例如，

DNA 分子单链的碱基排列……GTAACTTG……

RNA 分子单链的碱基排列……CAUUGAAC……

这样形成的新 RNA 分子称为信使核糖核酸(mRNA)。之所以这样称呼它，是因为它转录了 DNA 的遗传信息，也就是说 mRNA 具有了来自 DNA 的信息。由于 mRNA 分子可以进入到细胞质中去，迁移到细胞质中的 mRNA 也就将 DNA 的信息带到了细胞质中。在 mRNA 进入细胞质的核糖体的同时，携带着蛋白质氨基酸的转移核糖核酸(tRNA)也进入核糖体。就在这核糖体里，tRNA 完成以 mRNA 为模板连接氨基酸的蛋白质合成过程。

每一个 tRNA 分子都能在一种特定酶的作用下与一个氨基酸分子连接，形成一端是氨基酸分子而另一端是三个碱基的构成体。作为氨基酸的运载工具的 tRNA 在糖体的一个特定结合点与 mRNA 的互补片断键合，而特定酶再引导氨基酸脱离 tRNA 并连到多肽链上。核糖体再沿着 mRNA 链向前移动三个碱基的位置，使下一个三联碱基接受一个 tRNA。这个过程反复进行，一个多肽链就形成了，它从核糖体中脱离出来，就成为一个蛋白质分子。这种以 mRNA 为模板合成具有一定氨基酸顺序的蛋白质的过程，就是所谓的“翻译”。

DNA 分子双螺旋结构的发现，一方面将生命科学的基础置于分子的水平之上，置于坚实的物理学、化学和信息科学的原理上，更多地得到数学演绎力量的支持，从而导致理论生物学的出现；另一方面又导致了生物工程的大发展。21 世纪的生物学将沿着这两个方向蓬勃发展。

4. DNA 芯片

DNA 芯片，又称基因芯片(gene chip)，是一种高密度的核苷酸(DNA 探针)阵列。它采用在位组合化学和微电子芯片的光刻技术，将大量特定序列的 DNA 片段有序地固化在玻璃或

硅衬底上，从而构成储存有大量生命信息的DNA芯片。DNA芯片有可能将人类的全部基因集约地固化在1平方厘米的芯片上。目前已达到的密度是40万种探针/芯片，每种探针的空间尺度是10～20微米。在与待测样品DNA作用后，DNA芯片即可检测到大量相应的生命信息，包括基因识别、鉴定以及基因突变和基因表达等。其实这里说的探针只是一种比喻。事实上，基因探针只是一段人工合成的碱基序列。如果知道要鉴定的基因的碱基序列，利用碱基互补的原理，先合成一小段与要鉴定的基因的关键序列互补的核苷酸。为了识别方便，再在这一小段碱基序列上连接上一些可检测的物质。这样，把连接上标记的基因探针放入众多的基因混合物中，探针很快就会捕获目的基因并与它连接。探针连带它"钓"上的基因由于带有特殊的标记，故可以方便地找到它。

目前，DNA芯片主要是对生命信息进行储存和处理。利用DNA芯片可快速、高效地获取空前规模的生命信息。DNA芯片的应用主要有三个领域：

(1) 生物医学、分子生物学基础研究利用DNA芯片技术，可以寻找基因与疾病(如：癌症、传染病和遗传病)的相关性，发展相应的药物和治疗。

(2) 人类基因组研究DNA芯片技术既是人类基因组研究成果的重要应用，又是促进人类的基因组学和功能基因组学研究的新手段。它使生命科学研究从单个基因的孤立研究发展到多基因、基因组整体上研究的崭新阶段。

(3) 未来的医学临床诊断一旦弄清了疾病与基因的相关性，DNA芯片即可提供高效而简便的诊断手段。

正如微电子芯片的发展一样，DNA芯片技术将不断地向更高密度的方向发展，专家估计，几年内DNA芯片的空间分辨率将达到1微米水平。DNA芯片使人类对信息的处理和应用从人体外部深入至人体内部的生命信息领域，它是近年来在高新科技领域内出现的最具时代特征的重大进展。1997年，美国

《财富》杂志载文指出，在写20世纪科技史时有两件事值得大书特书，一是微电子芯片，它是计算机和许多家电产品的心脏，它改变了人类的经济和文化生活，并已进入每个家庭；另一件就是DNA芯片，它将改变生命科学的研究方式，革新医学诊断和治疗，极大地提高人口素质和健康水平。在21世纪，DNA芯片对人类生活的影响将是极其广泛而深远的。

5. 生物技术与社会科学关联的问题

生物技术的发展与社会科学也不是毫无关系的，这里先举一例来说明，如：生物技术中的伦理问题，有人将科学技术比喻为双刃剑和"潘多拉魔盒"，这是很相像的。的确，科学技术这个"魔盒"里装了很多好东西，但有时拿出来进行不正确的使用，会产生严重的负面影响。在科学技术上，有很多这样的例子，炸药、原子能、化工技术、造纸技术……在给人类创造财富和物质文明的同时，也带来了战争工具、环境污染和生存条件的恶化。这就提出了一个严肃的问题：在科学技术活动中，必须重视伦理道理规范，弘扬科学技术的正面效益，遏制其负面影响，更好地造福于人类。

有些现代高新技术活动，尽管暂时还没有看到明显的负面效应，但存在潜在的风险，也需要伦理道理规范，以预防不良后果或灾难发生。在生物技术领域，这类问题比比皆是，如克隆人问题、基因工程问题、转基因食品与转基因农作物问题、遗传资源和多样性保护问题、基因诊断与基因治疗问题等。它们涉及人类个体安全和国家安全、生物多样性和生态环境等重大问题，不可小视。基因工程技术可以打破种属之间的遗传屏障，很容易在实验室中进行各种遗传重组，制造出可能的"怪物"，直接威胁人类生命安全或破坏生态平衡；采用基因工程技术手段，有可能研制出针对某一种族的基因武器，从而对某一种族和国家的安全造成潜在的巨大威胁。如果允许克隆人的活动自由进行的话，许多意想不到的社会问题可能会接踵而至：人伦关系混乱、性别比例失调、希特勒优生理论的沉渣泛起。因此，对此类工作

不仅需要伦理道德规范，还要制订专门的法律，以规范其行为，使负面影响减少至最低程度。

6．深入解决生物学研究中的难题

生物学的发展中存在一些难以阐述清楚的，有的甚至是相互矛盾的问题，随着“Bio-x”研究的深入，其他学科的加盟，及其他先进手段的应用，可望有些问题能逐步解决，这里谈一个生物学中的老问题，遗传与进化的统一问题。

德国生物学家魏斯曼(1834—1914)在19世纪末试图建立遗传与进化相统一的理论的努力没有成功。当20世纪遗传学作为科学理论被确定起来之后，由于人们一时还没能认识到孟德尔的遗传学其实是加强了达尔文进化论理论基础的，而认为达尔文的理论退居到了次要地位。一直到新达尔文主义出现后，探讨进化论与遗传学统一理论才成为时尚。1928年美国生物学家威尔逊(1856—1936)出版《发育和遗传中的细胞》，提出细胞中的基因活动是发育的根本原因和遗传特性表现时空秩序的观点。1934年基因论创始人摩尔根出版《胚胎学和遗传学》，提出在发育的不同阶段有不同的基因在起作用的观点。40年代，在摩尔根群体遗传学的基础上赫胥黎(1887—1975)和杜布赞斯基(1900—1975)把进化论和遗传学结合起来，发展出新达尔文主义或综合进化论。新达尔文主义主张，进化速度和进化方向主要是由自然选择决定的，因为中性基因十分有限，基因突变、迁移和随机漂变在进化中只起辅助作用，并且基因突变对于新种形成的作用也只能是逐渐积累的。由于综合进化论将进化的驱动力主要归结为自然选择并且忽视发育在进化中的作用，虽然它对于小进化能给予遗传机制上的说明，但对于形态进化或大进化的遗传解释则遇到重重困难。

1967年新达尔文主义的信徒、日本科学家木村资生提出中性进化理论，认为分子水平上的大多数进化变异及物种中的大多数的多态不是自然选择，而是由选择上呈中性或近中性的突变等位基因的随机漂变形成的，把进化的主要驱动力从自然选

择转移到了随机的遗传漂变上。但这也只是分子进化水平上的解释，对形态进化并没有具体的说明。在80年代，分子生物学对发育的研究证实了摩尔根等古典遗传学家关于发育特征的时空秩序思想。分子发生遗传学对同源异形突变和细胞谱系突变的研究表明，对于形态发育和形态进化来说，最重要的是调节基因(亦称选择基因)，而不是结构基因(亦称实施基因)，一个或少数几个调节基因的变异就足以产生分类意义上的形态特征。既然形态进化主要是控制发育的调节基因或遗传程序变异的结果，因而可能以跃变的方式进行，新达尔文主义关于形态进化是由许多细小的基因突变积累的观点受到质疑。

现代的自组织观念也被用来探讨遗传与进化统一的问题。从远古海洋的有机分子中发展了植物、动物、人类和全球生态系统。是什么驱动自然世界朝着复杂性发展的呢？达尔文进化论以自然选择学说来说明，生物学家一直把自然选择看做是有序的惟一来源。自组织是最近发现的某些复杂系统的固有性质，即某些非常无序的状态自发地“结晶”成为高度有序的状态。远离热力学平衡的开放系统，当外界变化达到一定的阈值时，其中的某些涨落可能被放大而使系统达到一种在时间上、空间上或功能上的新状态。自组织是生命世界的重要特征之一，计算机模型正揭示这类复杂系统的如何能自发地自己组织起来以实现稳定的基因活动循环。这样，有机体之所以具有某些特征，也许并不是因为自然选择造成的，而是因为自然选择作用的对象具有自组织性。人们已经开始认识到，进化是自然选择和自组织相结合的产物。

遗传与进化的统一是生物学研究中的一大难题。就小处说，一个受精卵通过细胞分裂与分化如何发育成为一个结构与功能复杂的个体，是无数科学家100多年来孜孜以求而迄今也未能解释的重大课题。就大处说，地球上的生物进化问题还有许多谜。今日地球上的生命世界是经历了数十亿年生物进化的结果。地质古生物学的研究发现，地质史至少发生过五次大规

模的集群绝灭(简称“大绝灭”)和“复苏”。所谓大绝灭,指特定的地质时期里生物绝灭率突然升高,各种生物门类、大量生物属种在短暂的地质时隔内(如100万~300万年)全球性绝灭。这五次大绝灭发生在晚奥陶纪、晚泥盆纪、晚二叠纪、晚三叠纪和晚白垩纪。不仅这些“灭绝”和“复苏”之谜未解,而且,它们作为“突变论”的重要证据向占统治地位的达尔文生物进化“渐变论”提出了挑战。当今日益严重的诸多人类社会问题,如人口、地球环境、食物、资源与健康等重大问题,莫不寄希望于生命科学与生物技术的进步。而以分子生物学(包括分子遗传学)、细胞生物学、神经生物学与生态学为主干的今日生物学的进步,亟待遗传与进化如何统一这一核心问题的解决。

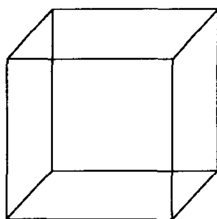
本讲不可能再罗列许多了,总之,学科交叉,互渗将会促进整个科学事业的不断深入和发展。

第十四讲 物理现象的非物理思考与非物理事件的物理思考

14.1 物理现象的非物理思考

科学的发展往往都是由观察物理现象开始,通过对现象综合、归纳和分析,逐步上升为理论,再把这个理论回到实践中去接受考验,而不断完善的。但是,这种观念也存在一些令人困惑的问题。例如美国科学家汉森(Hanson)就提出:同一物理现象对不同的观察者得出的结论是不相同的。也就是说科学理论不是通过现象(资料)中归纳概括而得出的,而有的却是用已有的概念,凭观察者的直觉,用概念来组织资料而推导出来的。汉森还反问道:两个对同一客体所持理论截然不同的人是否真的看到同一东西?设想开普勒和第谷两人看日出。开普勒看到的是太阳固定不动,地球绕太阳转动,而第谷看到的是地球固定不动,太阳绕地球转动。那么,开普勒和第谷两人在东方日出处看到了同一东西吗?有人可能会说他们确实看到同一东西,因为他们有共同的视觉经验。如果这是指他们的眼睛接受同样的刺激,或同样的视网膜映像,这就是说他们看到同样的东西,其实不然,因为视网膜接受映像是一种物理状态,而"看到"是一种视觉经验,这是两件事,不是一回事。有人说,他们都看到一个光彩夺目的黄白色圆盘,在一片绿色和蓝色之间,在这个意义上就是有共同的视觉经验。因此,他们看到的是同样的感觉资料,不同是由于对这相同的感觉资料解释不同所致。是不是这样呢?

请看图 14.1 是一个内克(Necker)立方体的图形。有人说它是块立体形的防风玻璃,有人看作是多边形宝石,有人认为是


图 14.1

在平面上的若干线条，有人说是块冰，有人看作鱼缸，等等。那么这些人都看到同样的东西了吗？不是。他们看到的是不同的东西。这也不是对相同的视觉经验作出不同解释。因为解释就是思考，而看到是一种经验状态，这些人并没有作任何思考，而是直接经验到不同的东西。

格式塔心理学（全形心理学）教科书中许多图形都是这种情况。人们从相同的视觉图像中看到了不同的东西。


图 14.2

例如图 14.2。没有见过羚羊的人看不出这个图形是羚羊，只能看出是鸟——鹈鹕。而没有见过鹈鹕但见过羚羊的人只能看出羚羊。也可以先看出羚羊，后看出鹈鹕。不论何种情况都是在同一图形上看到了不同的东西。当羚羊改变为鹈鹕时，是一下子发生的，并不需要去思考或解释。因此惟一可能的改变是人们看到的东西的组织，这个组织既不是视野的要素，也不是记录在视网膜上的东西。在 X 中看到不同的东西取决于关于 X 有不同的知识和理论。因此，当第谷和开普勒看太阳时，在他们凭视觉知道的是同一件东西，但是在他们经验的概念组织大为不同的意义上却看到了不同的东西。因此“看是渗透理论的”。对 X 的观察是由以前对 X 的知识形成的。

汉森的观察渗透理论对以后科学哲学的发展以及库恩(Kuhn)某些思想的形成有重要作用。但是否在任何情况下持不同理论的人都在同一对象中看到不同东西，恐怕还不能绝对化，否则，观察就没有任何客观性了。

这里顺便简单介绍一下格式塔心理学，因为格式塔心理学与汉森、库恩的思想关系都很密切。格式塔心理学又称“完形心理学”或“全形心理学”。“格式塔”原为德语词，意为“形状”、“样

式”。格式塔心理学认为人的知觉不是先感知到个别成分再注意到整体的，而是先感知到整体的形象，然后才注意到构成整体的个别成分的。如图 14.3，人们或看到是个高脚玻璃杯，或看到两个相对而视的侧面像。从一个图像转到另一图像是作为整体实现的，这种转变叫“格式塔转换”。

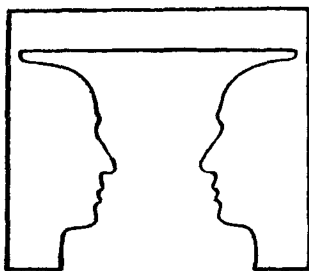


图 14.3

物理现象是客观情况对人们大脑的刺激，而主观的判断则是人们接受刺激后的思考，也就是人们的思想、思维过程，那么在科学发展中上述二者哪一个是第一位的呢？法国科学史专家 A. 科锐认为思想是第一位的，思维优先于现实的客观刺激。而经过思维得出的主观视觉经验与客观情况是有差异的，这可以用一些实验来证实。

图 14.4 摘自丹麦实验心理学家 E. 罗宾的一部著作。左图中 AB、CD、EF 平行等长，斜线 AD 在 G 处相交，$AG=GD$。右图中的 $AG=GD$。但是看起来右边的 AG 大于 GD。这说明主观视觉经验与客观情况是有差异的。

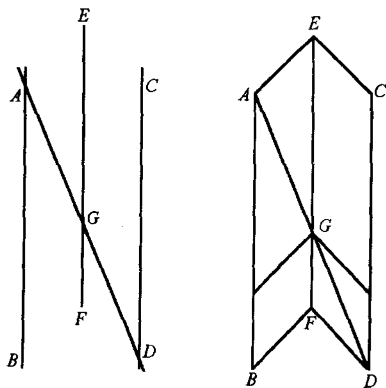


图 14.4

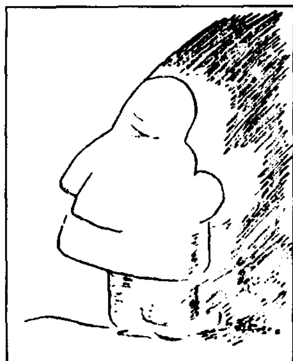


图 14.5

图 14.5 引自 E. 贡布里希的一篇论文。这图既是一个印第安人的侧面像，又是一个爱斯基摩人的背视图。我们可以随意地从一种图像转换到另一种。有些人转换到爱斯基摩人比较难，另一些人则相反。如果我们要看出是印第安人，我们可以注视鼻子、嘴、下颜，然后注视他的眼睛。而要看出爱斯基摩人，可以从注意他的右靴开始。这种客观上可检验的实验令人信服地表明人有意识经验。

思考和思维演绎的过程，一种是他的大脑根据外来的客观刺激的反应；一种是他大脑中既有的经验的联想，也就是发挥了其大脑的智能。从物理学的观点来看，有刺激就会有响应。但这个响应则因不同人的经历而不同。这则是非物理的了。这里介绍一位脑外科学家 W. 潘菲尔德的实验。他用一个电极反复刺激病人已经暴露的脑，这时病人躺在手术台上，意识完全清醒。当刺激皮层某些区时，病人报告出重新体验到的十分生动的视觉和听觉经验，而病人当时完全知道自己在手术台上。一个年轻的南非病人躺在手术台上，当电极刺激他皮层某个区时他报告说，他和他表弟在南非的农场里大笑，而他自己知道他正躺在加拿大蒙特利尔的手术台上。这种报告可以重复激发，这只能用存在着有意识的主观经验来解释。

我们完全可以想像，若对于另一个人同样刺激其大脑的相同部位他所体验到的则又是另一种视觉和听觉经验了。

上面我们讲的是，同一物理现象(客观实体)对不同的观察者而得到不同的结论。下面我们再进一步阐述对同一物理现象(客观实体)，对所有观察者都得到错误的结论——悖物理结论。这就是所谓的错觉问题。下面我们举几个例子来说明。

1965年12月4日在纽约市上空约3300米处发生了一架波音707客机和一架1049喷气机相撞的惨剧。死伤53人，相遇时喷气机在3000米高空，二者相差很大，可是喷气机判断错误，认为会撞机，就提升300米，造成了这场空难，如图14.6所示。

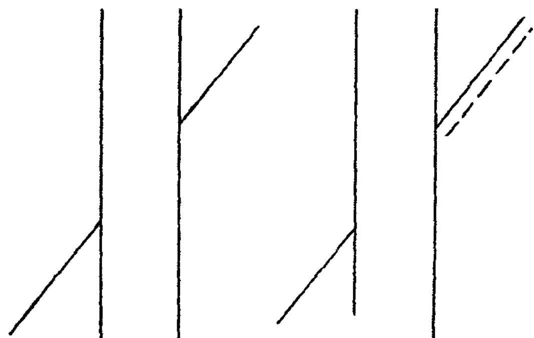


图 14.6

这种错觉造成的现象很多，如图14.7—图14.14。图14.7中，我们都错认为左边直线长，右边直线短。图14.8中，我们会联想出一个白色的等边三角形来，图14.9中有小纵线的空间的

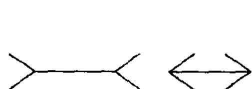


图 14.7

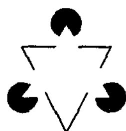


图 14.8



图 14.9

长度似乎比右边无纵线的部分要长些。图14.10中中间两点间的距离似乎比两边的点间距离要小些。图14.11中相平行的两条线呈现中间凸出的感觉。图14.12中左边中央部分的圆看起来比右边中央的圆要小。图14.13中左边内部的圆看起来比右边外部的圆要大。图14.14下部的线条看起来似乎比上面线条要短。

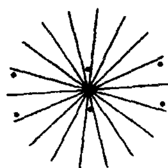


图 14.10

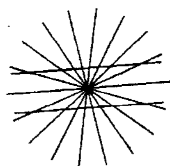


图 14.11

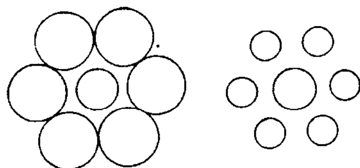


图 14.12

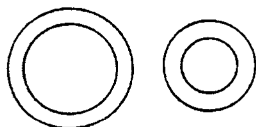


图 14.13

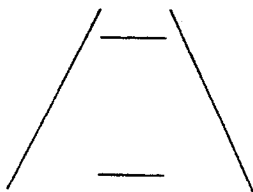


图 14.14

所有这些错觉的产生，都是因为在物理现象（客观实体）对人们生理刺激作用后，由于人不是单纯的机器、测量仪器而会有高层次的认知阶段，而在认知阶段，这样处理的相互作用及联想作用就产生了错觉。作为正常的人都一定会有同样的结果。

利用错觉也可使我们的建筑设计得到满意的效果。雅典巴特农神庙的设计是如图 14.15(a)所示的。但观赏者看到的都是(b)的形状，若建筑师设计成(c)时则会有(a)的效果。

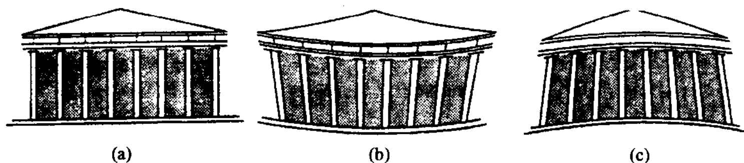


图 14.15

又如建筑设计中，利用人的错觉则会使同样的尺寸产生远、近、大、小不同的感觉，如图 14.16。

图 14.16 左边是从外侧向内看的图，右边是从内侧向外看

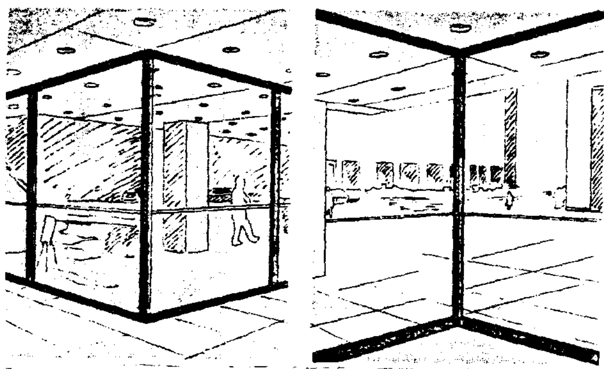


图 14.16

的图。同样的高度就会有不同的高、低不同的感觉和远近相距之感。

这里我们再介绍由于画面上的技术处理，使一个物理事件从心理学反映上产生不同的效果。这就是视觉心理学的问题了。

(1) 我们先介绍的所谓心理蜕变的问题。保罗·塞尚(Paul Cézanne)说：文学通过抽象手段来表达，而绘画则通过图画和色彩对我们的感觉与知觉作出具体的形象描绘。

西方对心理的看法是，心理区别于身体，它是对外部世界的独立的、不受干扰的一种感知。这一观点经 18 世纪德国哲学家伊曼纽尔·康德(Immanuel Kant)之手得到了最深入的研究。康德早期曾热情地主张根据牛顿的运动万有引力定律对世界进行科学的描述。他对天文学作出过重要的贡献——提出了太阳系起源的一种理论——并相信这样的观点：人的精神之外确实存在着一个现实世界，这个世界是可以用我们的大脑进行描绘的。然而，尽管康德早年很成功，但是他对人类知识的本质及人们获得知识的方式越来越持批判的态度。他认为在对外部世界的感知进行加工时，人的心理确实起着一定作用，它对信息进行组织。我们的大脑可看成是一个文件架或分类架，我们必须把对

外界感知的信息装入其间。因此在真实世界与我们所理解的世界之间必然存在着无法缩小的鸿沟,我们无法知道未经删改、未经转换的事情的本来面目,而只能知道经过我们概念体系过滤后经过修改的事情,因而很可能是扭曲的东西。我们对事物本质的认识常因我们脑中已有心理现象的影响而产生偏差,如图14.17毕加索的作品,画家笔下的模特就是几根线条了。

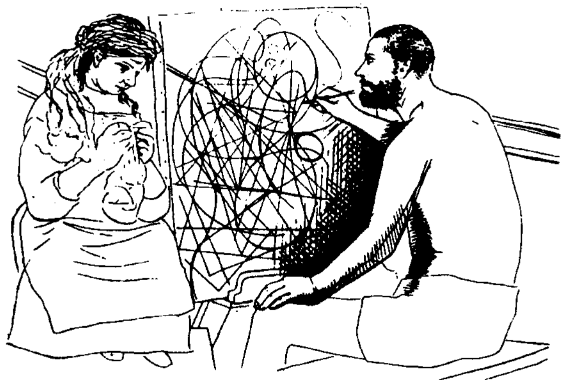


图14.17
毕加索的《画家与模特》,1932年

康德利用这一点来反击这样一种模糊的看法:当时他的同龄人一直在信心十足地探求现实世界的本质,并以此为出发点进而宣扬其复杂的知识体系。康德认为我们只是世界的观察者,实际上无法进入独立于观察者之外的真正世界,这实际上是我们自己把自己置于我们所在的“小”天地的中心。

(2) 在我们观察图案时,若图案是镜面对称,或是轴对称等的情况时,使人产生的是稳定的感觉,若是不对称时则会有不平衡感或动感。维克托·瓦萨莱(Victor Vasarely)和视幻艺术派的其他画家创作了一些复杂的图形,这些图形能使大脑对线条的确定,以及点和形状之间的联系产生一种不确定性,从而使人的感知产生一种不断变化的感觉,图形产生动态感。图14.18就是这种动态艺术形式的一个例子,图上的线条并未移动,你所见

到的东西却有动感。这个例子说明,我们心理范畴中的东西对我们的感觉所产生的影响。

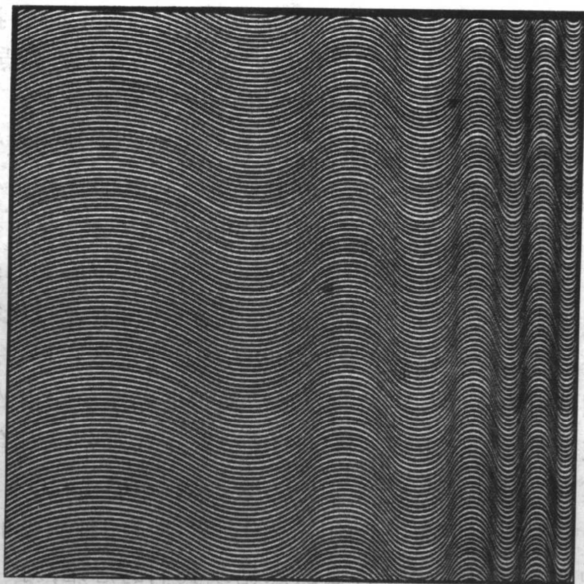


图 14.18　布里奇特·赖利瀑布状视幻状态,
1963 年,伦敦泰特美术馆

康德对于人们可以不依赖于心理而去了解世界的说法持怀疑的态度,尽管这一态度也具有说服力,但人们仍有一些不解之谜。为什么这么多的人会对他们所见到的这么多事情持相同的意见?看来人的想法有许多是一致的。时间变化了为什么我们对世界的想像会保持相对稳定?我们的心理不可能一夜之间改变,其中是否有什么原因?

对于真实的世界与人所感知到的世界之间究竟存在什么关系,这有两种截然不同的观点。“唯实论者”持一种极端的观点,他们认为借助我们的心理分类对外部世界进行信息处理是一种无害但很复杂的过程。它不会对外部真实世界产生实质性的影响,从而改变世界的特征。即使出现了很大差异,我们仍常常能

知道认知加工的情况，以确认是在什么时候出错，并作适当的修正。“反唯实论者”持另一种极端的观点，他们否认我们能了解难以捉摸的真实世界。在这两种极端的观点中间，可以找到一系列折中的观点，它们多得足以包括任何一个哲人的观点，每一种观点都在不同程度上扭曲了我们感知到的真实世界。

我们从康德的观点中发现了他对科学的世界观的担忧。在18世纪末，人们相信科学能成功地揭开大自然的奥秘。牛顿定律使人们更加确信自然界的规律之间的和谐一致，并相信自然法则与人类康乐之间的协调说明存在着对于人类有利的法则之神。康德的论点削弱了有神论的说服力，有神论者将观察到的一些法则视为一种证明大自然是以人类为中心的论据。这些自然法则很可能是通过我们的思维活动与世界发生作用的：它们不一定真正反映出事物的本质。这一观点并不是反对有神论，也不反对大自然是以人类为中心的观点。事实上，康德是相当同情自然界以人类为中心的观念的。康德试图说服他的读者，告诉他们我们不能仅凭自己的感觉或我们的思维，对“真实世界”的最终目的与实质作出完全可靠的结论。

(3) 东方的绘画(包括中国、日本等国)和西方的绘画在技法处理上有着明显的差别。东方的绘画是企图把您带进画家所画的世界中去，而在西方绘画前面，您只是一个旁观者来欣赏画家所作的画而已。(对此，在下一节还要再详细叙述，这里就不赘言了。)

由此可知，对物理现象(客观实体)的认识，还有很多需要我们深入研究和进一步利用的。

因此，我们应该得到一个重要的启迪：人是有思想的，对物理现象的观察，决不能停留于生理过程的反映上，观察是渗透理论的。

因此，我们应该认识到：

(1) 对物理现象的非物理思考，是人不同于“物”，不同于

“仪器”的可贵之处，对科学发展、人类进步是有意义的。

(2) 对物理现象的非物理思考能使我们学会更多的思考方法，能促使我们更好地认识世界和认识人类自我。

因此，这是我们科学工作者值得重视的一个问题。

14.2　非物理事件的物理思考

绘画中的物体的定位

上面谈到对物理现象的非物理思考及其引出的一些结论，下面我们再反过来讨论对非物理事件的物理思考。本节主要讲物理和艺术，而且着重阐述时间、空间，相对论等物理概念在讨论艺术问题中的延伸及应用。

在艺术界，在绘画中，西方中世纪以来基督教把空间支离破碎地分成不同的层次，它不是各向同性的，又是不可量度的；时间并不是如箭头或流水那样流逝的，而且也变成有的是蜿蜒成不同的区域，有的是世俗的，有的是神圣的；而光按照基督教的教义，光并非从某个源泉穿越时间、空间而来的，而是圣灵的外向表现，是沟通一个世界和另一个世界的桥梁。这些观念统治了西方世界的思想长达千年之久，在这种科学被神学信念所取代的时代，对艺术的发展也是起着禁锢作用的。到了中世纪后期，文化人中一些有好奇心、有叛逆精神的人，开始了反思和探索，乔托等人就是代表，在本书的第二、三讲中我们介绍了对物体所处的位置描述的笛卡儿坐标系。这里我们要介绍与这种绝对静止坐标系有关的绘画中的问题。这首先要介绍乔托，乔托是个农家孩子，牧羊时常以牧羊杖尖在地上作画自娱，所作之画颇为传神。当时有名的画师契马布埃(G.Cimabue)听到这个神童的传闻后，就主动来找小乔托，见面后结果是叹为观止，遂拿了一笔钱给他的父母，就收其为徒将小乔托带回佛罗伦萨了，几年后，乔托的画笔就超过了师父。突出的是他创造了在构图上

把视点放在一个静止不动的位置上，并由此点引出一条水平轴线和一条竖直轴线来。由是，乔托在绘画这一平面艺术上恢复了欧几里得的空间观察——虽说他并未动用大量的几何公理加以解释。它既是沿袭了上千年的扁平画面，同时又一下子得到了作为深度的第三个维度。乔托的这一成熟的表现手法，可以从其作品《金门相逢》(1306年)中看出来(图14.19)。这就是所谓"透视画法"。在这样的画法中，观画者的中心注意点位于画布前方的画外之处。还在乔托仍然在世的年代里，几乎所有的美术家在见到这幅作品后，都能领略到这样作画的优越性，这就是使来自画面的所有视线会聚到一点，如是形成一个躺倒的金字塔，观者的位置便在塔尖这个点上(图14.20)。

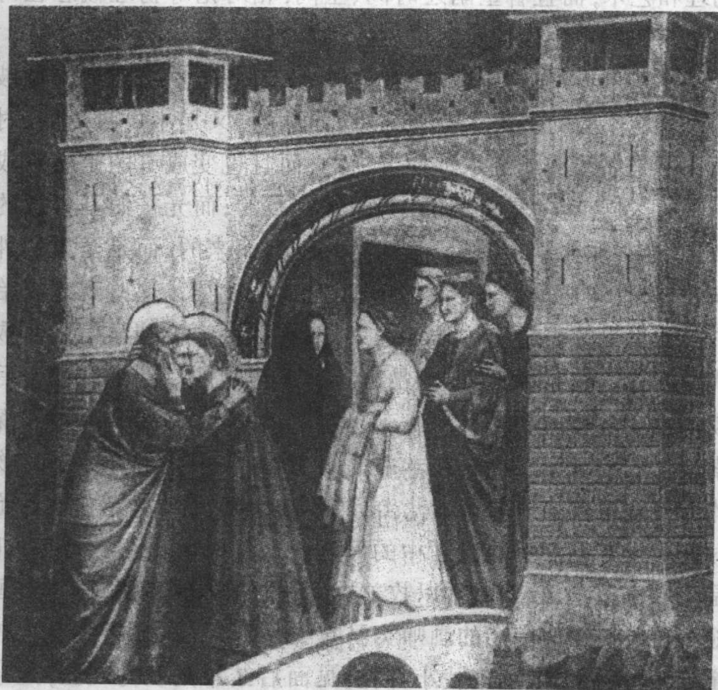


图14.19
《金门相逢》，乔托作于1306年，现藏意大利帕多瓦的斯科洛凡尼教堂

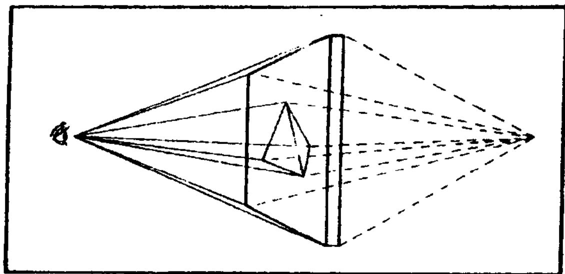


图 14.20

作图的透视法。所有视线会聚到观画者的眼睛所在处，由是形成一个优于其他地点的静止观察点。透视画法产生了景物后缩至没影点消失这一视觉效果。

在乔托重新组织绘画中的空间概念之后不久，艺术和物理学之间出现了一次罕见的一致。1360 年，一位名叫奥雷姆(Nicole d'Oresme)的中世纪教育家，提出了一种以图形表述科学函数的方法。图像是科学的不可缺少的工具之一。在一张画有水平横坐标和竖直纵坐标的纸上以图形表述有关运动、时间或空间的种种概念，这就使进行科学思考的人有了一个直观助手。使抽象的概念视觉化，是做出科学发展的必要前奏。很难想像，任何一门科学如果没有图表的帮助仍能达到现今的水平。美术上的透视画法也好，科学中的图像也好，有关的几何学、物理学原理是基本相同的。

有位艺术家是这样评价透视的重要性的，他说：透视原理把只有惟一一个视点作为第一要素，这便使视觉体验建立到了稳定的基础上。于是，它在混沌中创立了秩序，使相互参照实现了精密化和系统化。很快地，透视原理便成了一致和稳定的试金石。从物理学，几何学上来思考，这本不是一个什么值得如此推崇的东西，但是，在当时，对大多数人来说，透视原理是个令人惊奇的愉快的技术进步。它出现后受到了热情的欢迎，有如今日的电脑。文艺复兴时期的父母都盼望子女能从事与透视原理有关的职业，原因是社会上大量需求。谁要是懂得透视原理，就很

容易找到职业,比如在军界工作,计算抛向敌方石弹的弹道;非军事的职业也有,如测绘、航海、建筑、制图、工程等,都需要懂得透视原理的技师。

至此,应该说,这不仅是在二维的平面(纸面)上,来描述三维物体的图像,而且是已把远近不同的物体同时描述出来了。这应是欧几里得几何和笛卡儿坐标系在绘画中的应用,为了使对世界的描绘易于理解,无论是物理上还是艺术上,人们都试图把复杂的世界缩减到易于处理、易于表现的程度。因此,上面介绍的透视法实际上是一个艺术和物理、几何结合的一个很好的例证,这也是对非物理事件的物理思考。为了增强透视的效果,佛罗伦萨有一位名叫弗兰西斯加(Piero della Francesa)的艺术家把阴影引进了绘画。在此之前,画家表现物体时,一般是像在动画片中那样不去表现阴影;即便偶尔为之,也大抵与有关物体不一致甚至令人莫名其妙。这是因为画阴影的画家不懂得在运用透视原理的空间里,阴影起着组织画面的作用。贡布里希曾说过:"……要说到能清楚地意识到阴影所能带来的巨大新作用,那是非弗兰西斯加莫属的。……光不仅有助于塑造形象,而且对透视也有同样重大的作用,因为它能制造出深度这一幻象。"在弗兰西斯加的绘画中光是沿直线传播的。这种对光的本性的认识要比牛顿、莱布尼茨早 200 年。

当然,在我们所学过的运动学中,对运动的描述,我们用了运动方程来定量计算,并得到它在某位置时的速度、加速度,而关于艺术对感性认识的描绘、表达,则往往是通过连环图画的形式来表现的。这好比一名不谙摄影的业余摄影爱好者,在用非自动相机拍摄高速运动中的物体时,选取的速度不当,造成了模糊的照片,若用学术上的语言来描述时,它是把几个在不同阶段的曝光图像叠加在同一幅图画上了。当然,对于摄影这是一个蹩脚的作品,可是这个让照片多次曝光来表现物体运动的方法,却启迪了画家,使画家用它来表现物理运动的方法了,如图 14.21。在照相机发明后,上述的透视理论更能得到证实。光学

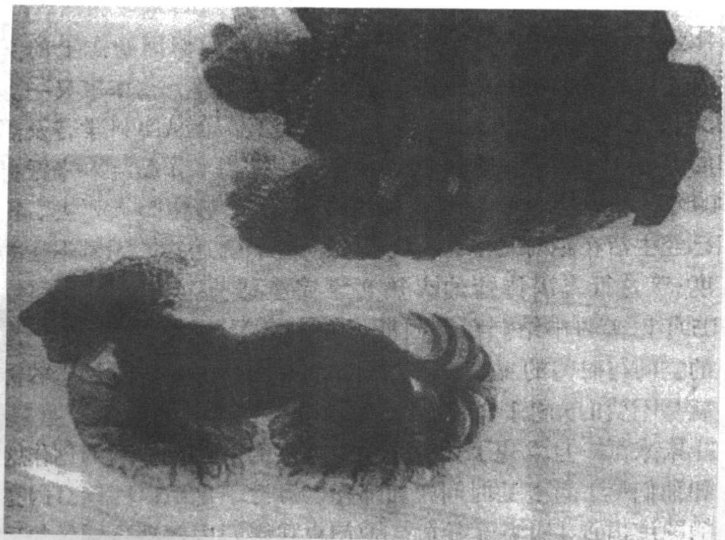


图 14.21 《戴套索的活泼小狗》,巴拉作于 1912 年,
现藏美国纽约州布法罗市阿布赖特-诺克斯艺术馆

中的小孔成像更为人们提供唾手可得浅显通俗的例证。

本讲前半部分,我们曾讲了视觉错觉的问题。其实,透视图实际也可以认为是人们的一个视觉错觉,因为在透视图中三维物体竟然可以用二维图像逼真地表达出来了,画家常用这种错觉和人们的真实感性认识开玩笑,现举两个例子。

图 14.22 是一个不可能获得的三维图像。

图 14.23 是艾舍尔画笔下的一幅"瀑布",粗看这张图或分割成不同部分来看,你什么也没有发现,但仔细地看,都发现它严重地违背了经验和自然规律。

另外,我们常见的立体画是利用了人们左右两眼视觉效果不同在头脑中合成而感觉出的立体图,图 14.24 表示的是左眼所见和右眼所见的不同的图像,而同时得到的图像在头脑中结合而得的就是立体图像了,图 14.25 表现了一幅无规画像,而可以看出来某种立体的感觉。

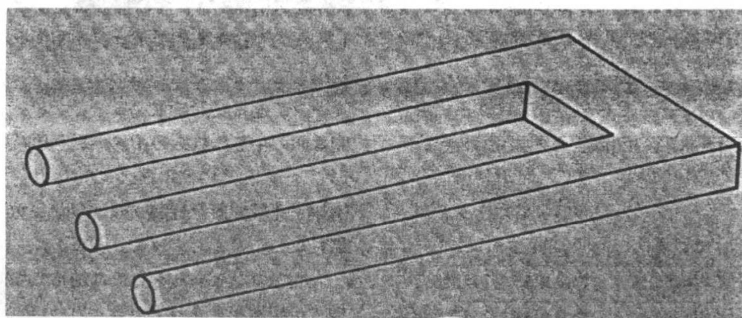


图 14.22

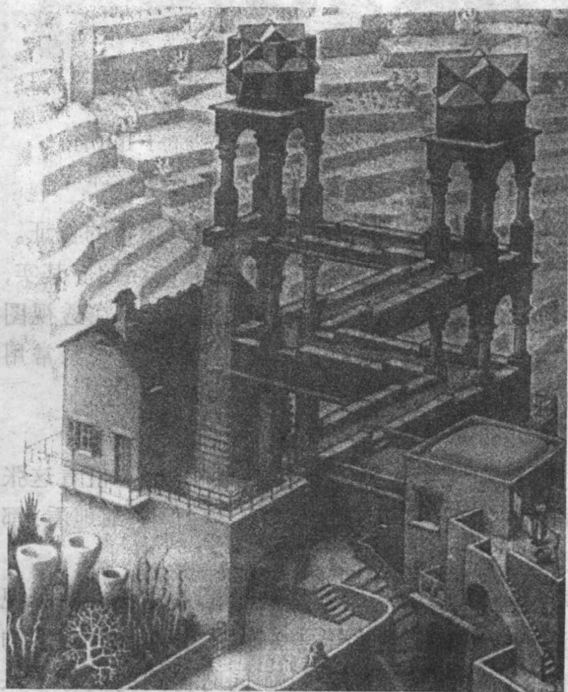


图 14.23 《瀑布》



图 14.24

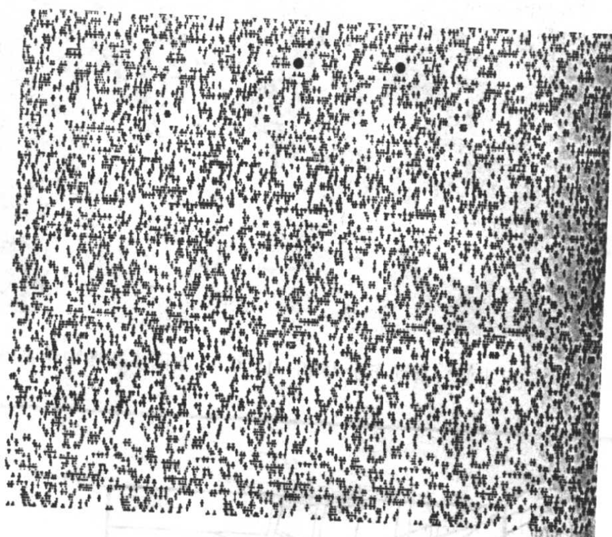


图 14.25

其实，现在的激光全息也是利用了两束光来合成，一束作为参考光束，一束是图像光束，合成后就可以得到一虚的立体像。它和立体画的不同的是它本身已将两束光合成为虚的立体像了，而立体画则是通过人的两只眼睛在一定位置从不同的角度上观察得到两个光束，作用于视网膜而使人得到立体画效果。

对于绘画，一幅画就只应有一个坐标系，塞尚则采用了一种亘古未闻的新手法，即摒弃一张画中只有一个视点的做法，而将诸多视点引进同一张画面。在《果篮》(1888—1890)中，他将各种静物从不同的观察角度画到上面(图 14.26、图 14.27)。



图 14.26 《果篮》，塞尚作于 1888—1890 年，法国多塞博物馆收藏

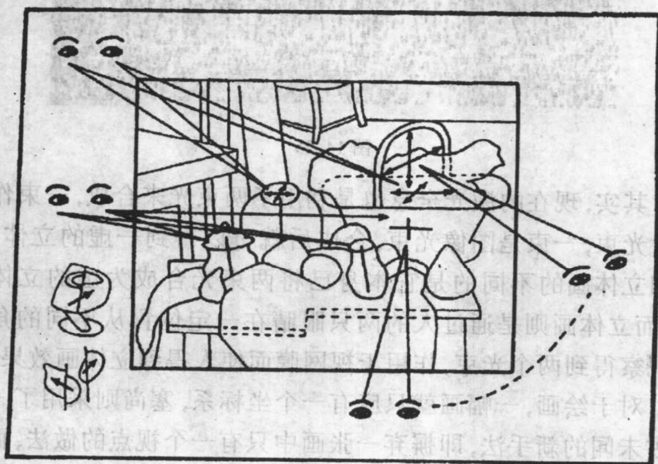


图 14.27 塞尚所绘物体得自不同高度和不同角度的透视观察示意图(转引自洛兰(Erle Loran)，《塞尚的构图》，美国伯克利加州大学出版社，1943 年)

塞尚的这一革新将一个问题摆到了人们面前：在视觉世界的相对层次这一最重要的观念中，没影点的地位应当放在哪里，优势视点的概念又重要到何种程度等问题提出来让人们思考了。

塞尚画中的物体看上去不是视网膜聚焦点所得图像的精确复现，而是将环视结果放到一起。也许这就是环视全景电影发明的先驱吧！

这里还需要讲起的是一个有趣事实，在文艺术复兴时期时画家们发展了几何直觉感，在二维平面上要创建三维透视就必须有这种直觉，同时画家们又与雕塑家们一起努力拉近了观画者与所画景物之间的距离。但是这种拉近的关系仍处于一种人画分离的状态。运用透视法的结果是把赏画的人从画框中所描绘的景色中拉出来，随之而来的必然是主观性，我们被安排之于画面之外，从外往里看。这种将画中景物与观赏者相分离的做法与在更抽象的层面上，看待人的思想和外部世界之间的关系一样有很多相似之处，欧洲哲学家从笛卡儿开始就对观察者与观察对象作了明确的区分。我们在感知外部世界时往往把自己放在完全隐蔽的、观察者的位置上，对世界的观察没有一次能够改变这样的性质：外部世界就是外部的。但并不是所有的文化都反映出感知者与感知对象之间这种分离的。中国的山水画采用一种十分吸引人的方法来处理在二维空间中表现三维空间的矛盾。它不采用西方线性的透视法，即把观察者的视点放在画外的某一点上，放在画布的前面。相反，它把视点置于山水中的一个不确定的位置上，人们无法讲出观察者处于所画山水中的哪一个位置。这样，观赏画的人就成了景物的一部分，就像画家感到自己就要想要表达的那些东西一样。中国的山水画有意不给观画者留下任何线索，使他意识到自己处在画中的什么位置。如果我们想要寻找最佳位置，我们就必须研究整幅画，寻找难以捉摸的视角，促使人们从许多不同的方面去理解这幅画，从而避免了只赋予画面单一含义的做法(图 14.28)。

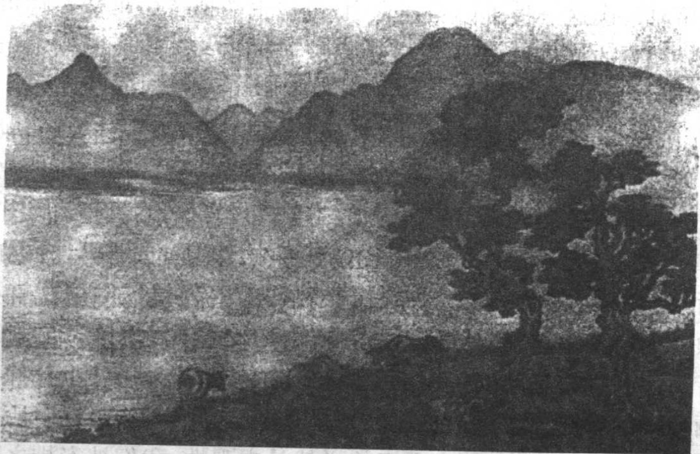


图 14.28 中国山水画家的河边牛，摘自 1937 年在伦敦首版的《默默的旅行者——湖畔的中国艺术家》

在这些东方的山水画中，另一种表现视觉的巧妙方法是不用投影。投影增强了透视错觉的效果，因为由阳光而形成的阴影长度和方向决定了观察者在时空中的特定位置。将无阴影的东方作品与运用阴影的西方绘画大师如伦勃朗(Rembrandt)或弗美尔(Vermeer)的作品对照，会发现很大的差异。

通过透视中的不确定性引起赏画者对画的欣赏与品味，这种做法反映了许多东方艺术的表现手法。它的目的在于强调在欣赏自然之美时我们的中介作用，而不仅仅是以另一种静态的艺术形式去展示我们复制自然美的能力。它对观察行为的重视是显而易见的。西方美术作品一直是陈列在外的，而精致的东方丝绸画只有在一个人偶尔独处、沉思的安静环境中才把画卷展现出来。这种东、西方绘画的差异也可以再补充一下我们上节的论述，这也是物理事件的非物理思考的又一例证。东方画卷把人融入其中了。

绘画中的相对论

1905年爱因斯坦发表狭义相对论以来，在物理世界中起着很大的震动，而有趣的是这个阶段一些未来派的画家提出了他们的宣言，其宣言中对时间、空间的看法以及他们在作品所体现的更是和爱因斯坦有异曲同工之处。爱因斯坦1905年发表在一份被不少人认为是“满纸天书”的德国杂志上的文章，是无从传播到意大利去影响这帮新画家的。艺术家又一次在文化的前进道路上率先造成了一场变革，在从事科学普及活动的人得以表述这些概念之前产生出一批艺术作品。未来派在1909年的宣言中自信地说：“时间和空间都已在昨天死去。我们已经生活在绝对之中，因为我们创造了永远的、无所不在的速度。”这行充满诗情的火热文字完全能充当爱因斯坦那篇1905年论文的小结。在爱因斯坦和未来派的成果问世后，传统的空间与时间的观念确实已经死去，打开大锁揭示秘密的钥匙就是不变的光速！

1912年，杜桑画出了《下楼梯的裸女（作品二号）》（图14.29）。此时，他并未看到过任何意大利未来派的作品。而这幅作品的未来派风格十足，又兼有立体派的格调。杜桑曾应邀在一次专为立体派举办的画展上展出自己的这幅作品。立体派成员主要是法国人，对南边那些爱夸夸其谈的意大利同行表现出一种冷冰冰的优越感。杜桑为能进入这样一届有毕加索和布拉克等名家参加的画展十分自豪，便带着《下楼梯的裸女》的新作前来参展。当时，立体派的发言人是阿波利奈尔。看到这幅画后，他感到不对头——此画在他看来未来派味道太浓，不宜同毕加索、布拉克的作品陈列在一起。不过他当场什么也没有说。杜桑在下午监督着把自己的画挂好后，便离开展厅回家了。而他刚走，阿波利奈尔和仍在展厅的参展立体派画家就争执起来，为这幅画是否同立体派作品风格一致而吵得不可开交。激烈的争辩一直持续到午夜还没有结束。最后，杜桑的几位兄弟在拂晓时分被派去叫醒杜桑，通知他回美术馆取回自己这幅不合群的画。在包好自己的作品放入出租车内之后，杜桑赌咒发誓地

说，他这辈子再不要同任何“一帮”画家打交道。



图 14.29 《下楼梯的裸女(作品二号)》，
杜桑作于 1912 年，现藏美国费城艺术博物馆

他说自己的这幅画是“通过对运动的抽象表现来表述时间与空间”。这很快便得到了印证。在 1913 年美国纽约举行的现代艺术国际展览会上(如今这个展会已经十分有名了)，《下楼梯的裸女(作品二号)》一跃成为最引人注目的展品。这次展会让美国人第一次接触到欧洲的激进新艺术形式。在杜桑这幅画的前面总是围着一群人。看惯了温和风格的美国评论家不知对这位青年艺术家的“不骂煞、就捧煞”的作品该如何是好。评论家斯垂特(Julian Street)称这幅画为“木瓦厂的爆炸”，结果杜桑是

以这个诨名给自己在艺术史上取得了小小的一席之地。另有一位评论家说此画让他想到《楼梯下的裸体人》。当时的美国总统西奥多·罗斯福(Theodore Roosevelt)批评它看上去像块挂毯。然而,而杜桑的这块混乱得使人头昏目眩的画布后面潜藏着凝滞,这是在光速 c 下时间达到同时性的凝滞。立体派已通过把物体弄成一个个不相邻碎块的方式表现了空间的同时性。杜桑则把时间间隔加以压缩,同样使风吹池水那则佛教故事中的池塘水平静下来。

倘若爱因斯坦能委托杜桑通过画面表现接近光速时间会发生的情况,一定会得到较好的结果。画家的《下楼梯的裸女》既可以说存在于过去,也可以说存在于现在和将来。宇宙中惟一能观察到这种情况的场合是骑乘上光束行进。不过在杜桑创作此画时,他是否听说过爱因斯坦这个人都很难说。但艺术家的高度的想像力,使人们感到他们的超凡的艺术造诣,这里介绍的是他们作品中反映出来的洛伦兹收缩的效果。

瑞士雕塑家吉亚柯梅蒂(Alberto Giacometti)在"挤人干"上走到了顶点,按照作家萨特(Jean Paul Sartre)的说法,他这是要"去掉空间的脂肪"。在吉亚柯梅蒂自己的"内眼"看来,他在1947年创作的《指指点点的人》(图14.30)是非洲隆迪族的一个牧主,而在物理课堂上,这个一把骨头的角色又是展示运动速度接近光速的观者所将看到的人形。是什么直觉启示这些艺术家采用如此特殊的、当时除艺术外只存在于尚未为公众知晓的有关空间的理论公式之中的变形呢?这是一种罕有的巧合吗?也许这些艺术家都悟出了理解空间的同一新方式?

随着20世纪的不断前进,后立体派形成了在全扁平图像上再求发展的新风格。康定斯基、马列维奇和蒙德里安都完全摒弃了透视画法,现代绘画从此进入了以不表现纵深为宗旨的阶段。深度如今坐上了冷板凳,这种风尚一直在整个世界里持续着,可以肯定地说,"画扁画"是20世纪绘画中最持久的特色。变扁的空间正是从达到相对论高速度的火车里向前或向后张望



图 14.30 《指指点点的人》,吉亚柯梅蒂作于
1947 年,现藏美国纽约现代艺术博物馆

时所应看到的情景。

在广义相对论中,物理学中在讨论加速度作用与惯性力的关系问题,讨论失重下的情况等等论题,而很有趣的是画家们却以其独有的艺术的敏感创作了一批有趣的作品,对这些作品,用物理学的观点,用爱因斯坦相对论的观点来思考是很有意思的。从 1899 年起,莫奈开始以他在法国几沃内一座小花园里的一架跨在池塘上的日本式小桥为题材作画(图 14.31)。对这座桥,他前前后后反复画了 20 年。但从他的画上,却看不出这座桥的落点位置:没有桥桩,没有桥基;观者只能看到桥体的一截,好像

悬浮在空中一般。这座桥画到后来,竟然与桥周围的明亮空间融合起来,产生了重量不复存在的感觉。

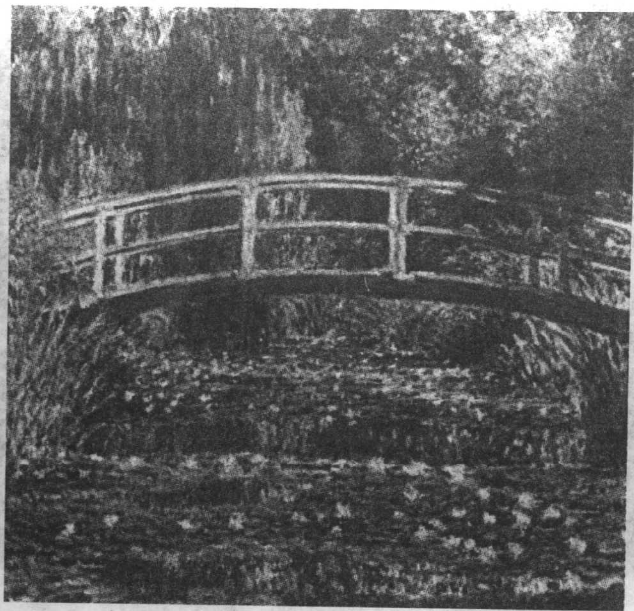


图 14.31 《睡莲和日本式小桥》,莫奈作于 1915 年,现藏美国普林斯顿大学艺术博物馆

谈到失重的问题,现代艺术也比爱因斯坦的发现先行了一步。在马奈让双腿脱离地面以后,画家们开始描绘起不再受地球引力的沉重约束而在空中飞翔的人物。

在马奈的《福里-白热尔的酒吧间》(1882)(图 14.32)一画中,作者捕捉住了空间和时间具有互补性的本质。这幅作品是马奈的最后宣言,是在他身罹疾病、常为疼痛和极度疲乏所苦之时完成的。由于他的病,也由于艺术评论家那时也习惯了他的悬着谜团的画作,马奈的这幅作品的种种古怪之处,大多被归因于他的伤痛心绪。其实,他的这幅作品是表现着对未来的期待。

这位充当着现代艺术先锋角色的画家，在这幅画里表现了互补原理，比玻尔早了45年；它表现的狭义相对论的主要内容，比爱因斯坦早了24年。

图14.32 《福里-白热尔的酒吧间》，
马奈作于1882年，现藏英国伦敦克特尔德学院美术馆

这幅画中有一位年轻女酒侍，面无表情地站在一面大镜子的前方。从镜子里可以看到为马奈熟知的福里-白热尔酒吧间的喧闹场面。虽说马奈最为人们所知的创新是取景透视的缩短，但这幅画却使观者产生空间变得深邃的印象。马奈画中的镜子成了观望宇宙的窗子。出现在镜子里的人群随着距离的加大变得越来越模糊。这家酒吧间好像是没有后墙似的，只有一条由人形成的水平线，同朦胧的无限空间融为一体，制造出一种强烈的深度感。一盏悬在人们头上熠熠生光的水晶吊灯，好像并不是从天花板上垂下来的，倒像是宇宙间的一座星系。这盏吊灯，连同其他大小不等的发出白色光芒的闪光光点和光圈

——它们也同样看不出同天花板有什么关联——使观者产生了看到的并不是一面镜子，而是明澄夜空的印象。

马奈还进一步不让地面在画面上出现，这更加强了这样的效果。头顶上没有屋顶，脚下没有地面，反映在镜子里的众多人物看上去都悬在空中。在画布的左上角有一双人腿，但没有人体的其他部分，看上去像是从秋千上垂下来的，它们产生出一种不存在重力的失重效果。因此，向侍女的背后望去，看到的是一片广袤的宇宙。

再细看这幅作品，还可以看出构图中的一点奇特之处。从镜子中可以看到侍女的背影出现在偏右的位置上，而且正在同一位顾客打交道；再有，她的背影是向前方探出的，仿佛是在撩拨对方，而她的正面形象却站得笔直。再说，如果真有个男人站在她面前，我们是看不到她的全部上身的。这个男人在此处出现，而在彼处则消失，画面的构图处理手法是双重表现。

事实上，马奈是从两个不同的角度表现这家酒吧间的。每个角度提供的信息都不在另一组信息中出现。马奈在这里提出了一种处理概念，这就是对同一景象从空间中两个分开的视点进行观察，而这两个在空间中分开的视点又处于不同的时间上。这一艺术上的深刻观念超前了爱因斯坦理论断言，即要想对宇宙有进一步的理解，人们必须将时间、空间实在的两个对立的方面结合起来。

另外，特别是夏加耳更超过他的前一辈画家，他不再画那些杂技演员和江湖艺人，在他的作品中到处都可以看到漂浮、飞翔和升空的人物。在《我和村民》(1911)(图 14.33)中，夏加耳推出了一幅同零重力这个概念相符的图像。画中的两个人不仅在空中飞翔，而且其中有一个还是“脑袋朝下”的。“朝上”、“朝下”、“高于”、“低于”、“在上”、“在下”、“顶上”、“底下”这些词语，事实上并不是欧几里得空间的矢量，而是同重力有关的概念：“朝上”的东西是在离开重力的中心，而在靠近这个中心的东西就是“朝下”的。我们无法看见“朝上”和“朝下”，却能感到是在

"朝上"还是在"朝下"。不过，既然重力是三维宇宙中的虚构，所以，这些词语在四维的语言里就不会有任何意义了。对于这位美术家来说，像"朝上"和"朝下"这类方向已经失去了牛顿赋予它们的意义，它们已经被爱因斯坦的革命排挤到三维角落的边边上去了。



图 14.33 《我和村民》，夏加耳作于 1911 年，现藏纽约现代艺术博物馆

一般人也许会认为艺术家在艺术世界中遨游，往往会囿于牛顿力学系统中默认牛顿重力的现实信念来思考问题，其实不然，有些艺术家都超前了，如，马格里特，他在几幅超现实主义的作品中，例如在《比利牛斯的城堡》(1959)(图 14.34)中，却偏偏

选择了这个被认为是特别可靠的信念作为重新考查的对象。在一般人的想像中,大概没有什么比山和城堡更沉重、更厚实的东西了。马格里特就正好把这两者结合起来。他毫不掩饰地背离了牛顿力学中的最基本的定律——万有引力定律。

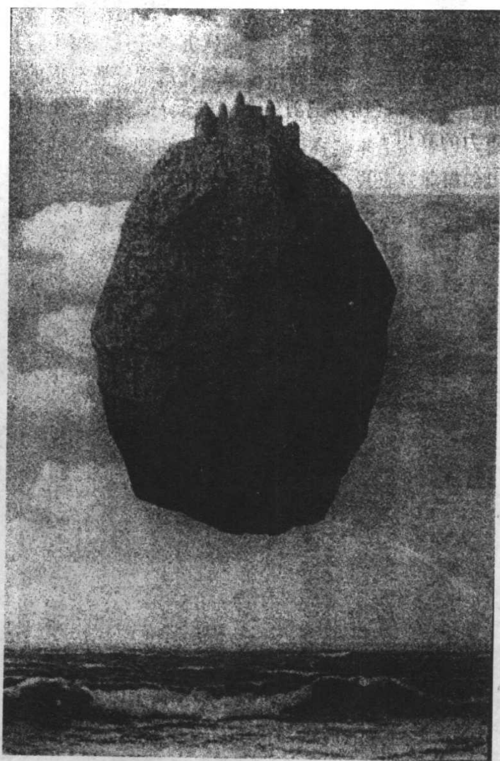


图 14.34 《比利牛斯的城堡》,马格里特作于 1959 年,现藏耶路撒冷以色列博物馆

艾舍尔同样也对关于重力的传统信念提出挑战。他在一张题为《三球,Ⅰ》(1945)(图 14.35)的优美剪纸上,利用射影几何线条,表现了重力压迫并使之变形的效果。从传统的透视学观点看,这三个球是一个叠在另一个的上面。上面的那两个球的

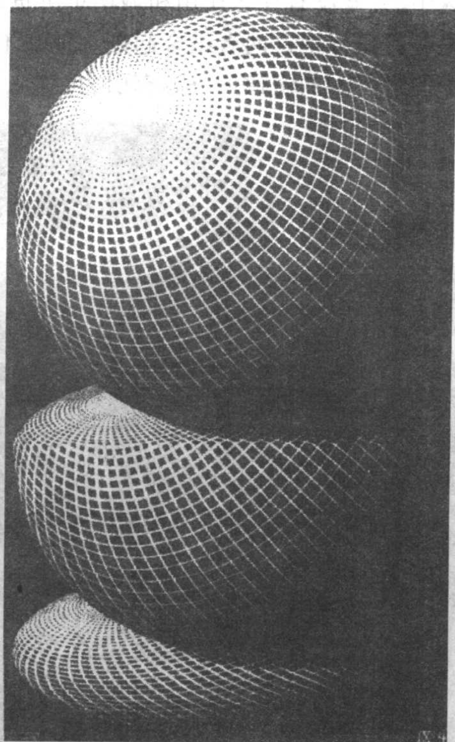


图 14.35 《三球，Ⅰ》，艾舍尔
作于 1945 年，哈格斯珍品博物馆收藏

重量显然是把下面那个球压扁了，这样，作者就用图解法表明了受重力作用所产生的变形效应。但是，当观画者改变一下看法，从另一角度来考虑《三球，Ⅰ》时，他就会发现，原来所认为的受重力而变形其实并不存在，只不过是二维的剪纸所造成的三维错觉而已。只要在透视法所造成的平面图上再加上另一维(比方把剪纸卷成柱形)，观画者便可以洞察三维重力的真相了。

这方面的绘画作品还很多，这里就不一一介绍了。

二象性在绘画中的体现

对于现代物理学的波粒二象性，其本身原来就是一个使人难以理解的物理概念，它们是矛盾的统一体。艺术家艾舍尔的一幅画却生动地表现了这一命题。

艾舍尔是位艺术家，他不用逻辑学，也不用公式，单用图画就揭示出为患西方哲学界达 2500 年的这个问题。他由相反通过中介达到相成的兴趣，在他以阴阳双刻技法创作的版画中表现得最为明显。《天与水第一号》(图 14.36)即为一例。这幅画的两端是白与黑相反两色，其间画有一行行重复的鱼、鸟等，它们逐渐在形态上变化，越过画面中央到另一端后就变得相反了。艾舍尔以这种无言而优美的图画，刨除了亚里士多德 2300 年前建立了西方逻辑大厦的一个支柱。亚里士多德的观点具体表述就是：A 是鱼而 B 是鸟，如果 A 不是 B，则 A 不能是 B。艾舍尔

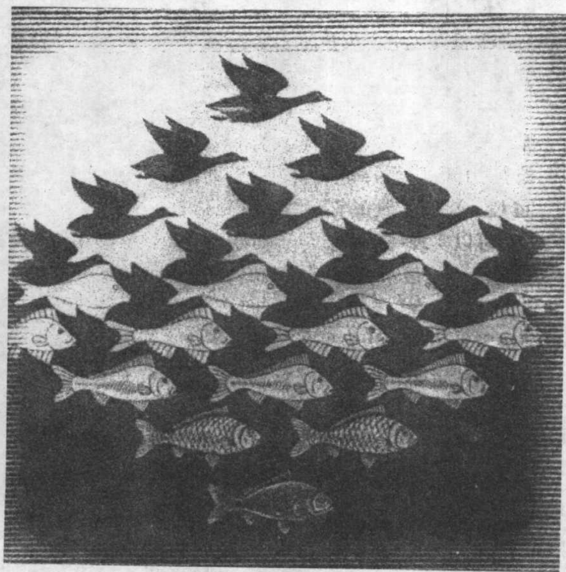


图 14.36

《天与水第一号》，艾舍尔作于 1938 年，

现藏荷兰海牙海格斯·盖门特博物馆

对这种非此即彼的二分法将了一军，而妙就妙在他只用图画、不用公式，就向观者表述了复杂的概念。这样，空中飞的与水中游的巧妙互相转化，同时它又既对立又统一。也有人说，这一幅画还有另一层意义，若用新的时空观来作物理思考也可以认为爱因斯坦和闵可夫斯基要是看了这幅画应当会评论说：如果鱼代表空间，鸟代表时间，在时空连续系统里，这二者是可以互换的。

本讲主要介绍了物理事件的非物理思考和非物理事件的物理思考这两种思维方法。其实与这两种思维方法相关的例子是很多的。我们不可能都作介绍。这里只能寄希望于读者今后结合自己的专业去讨论了。

第十五讲 物理学研究中的常用思想方法介绍

物理学的发展史告诉我们,一个科学理论的形成离不开科学思想的指导和科学方法的应用,正确的科学思维和科学方法是我们认识世界的基本手段,掌握了它就能使我们透过现象看清本质,从认识科学的必然王国而跃进到掌握应用科学的自由王国。科学方法是我们打开科学大门的钥匙,无论是自然科学的各学科或者是社会科学的各学科,掌握了研究科学的方法,你就有了在未来从事各项工作的"武器",你就能创新,你就能发明创造,发挥你的聪明才智,成为一个有益于人类、造福人类、贡献于科学的有用人才。下面就介绍一下物理学研究中的一些思想方法。

15.1 分析与综合

15.1.1 分析与综合的关系

牛顿曾说过:"在自然科学里,应该像在数学里一样,在研究困难事物时,总是应当先用分析的方法,然后才用综合的方法。"恩格斯也说过:"思维既把相互联系的要素联合为一个统一体,同样也把意识的对象分解为它们的要素。没有分析就没有综合。"①

分析和综合是抽象思维的基本方法。所谓分析,就是把研究对象分解成为各个组成部分,然后对各个组成部分加以研究的一种方法;所谓综合,就是把研究对象的各个部分联系起来,

① 恩格斯,《反杜林论》,人民出版社 1970 年版,第 39 页。

从而在整体上把握事物的本质和规律的一种方法。简单地说，分析就是从整体到部分的思维方法，综合则是从部分到整体的思维方法。分析和综合是相辅相成的，分析就是为了综合，没有分析就无法综合，分析是综合的基础，综合则是分析的归宿。分析的方法一般可分为三个环节，并常常采用两个手段。这三个环节是：

(1) 把整体加以“解剖”，把部分从整体中“分割”出来；

(2) 深入分析各部分的特殊本质(这是分析中最为重要的一环)；

(3) 进一步分析各部分间的相互联系和相互作用。

常用的两个手段则是：

(1) 原始资料实验数据的获得，就是首先要获取第一手资料，包括原始的资料、事实、素材、实验数据等，这些要尽可能完整、正确，不带有偏见和误差；

(2) 用抽象思维的方法进行加工、整理，并能上升变为观点，或有说服力的定量关系等。

例如，我们曾介绍过丹麦的天文学家第谷做了大量准确的天文观测，这些数据都是非常珍贵的资料。他的测量都是用肉眼进行的，他的测量的准确程度也是惊人的，其角位置误差小于0.067°。就相当于把一个缝衣针的针孔放到一臂之远处，用肉眼观察的张角相类似。这对分析与综合的研究来说，是具备了很好条件的。但是，尽管第谷擅长观察，并且非常准确，但他却缺乏正确的抽象思维能力，因此他得到的结论却是错误的。正如他的学生、助手开普勒所说：“他是个‘富翁’，但他不知道如何正确使用这些财富。”开普勒依据第谷的观测资料讨论行星轨道，当先验的圆形轨道与观测数据不一致时，他就抛弃原来的模型，采用与观测数据相吻合的椭圆轨道模型。他认为假说提出的主要目的是“说明现象，及其在日常生活中的用途”。如果一个假说明显违反观察到的事实，决不允许用一些方便的假设去掩盖这一矛盾，而是从可观察的实验现象作为出发点，从事实本

身寻求运动的原因。在思维方法上开普勒应用的是先分析后综合，他先以“寻找宇宙数的和谐”作为出发点，先把太阳系这个整体分解为各部分，并从中找出研究火星轨道中的8′的相差作为主要矛盾来深入，紧抓不放。用开普勒自己的话来说：“这8′是不允许忽略的，它使我走上改革天文学的道路。”由此，才得出椭圆轨道的定律来，然而，分析又必须以综合为归宿，对各个行星的行为进行分析的目的又是为了综合，即为了找出整个太阳系的整体运动规律。

一个第谷，一个开普勒，两个人是一对无形之中的配合默契的师徒。第谷擅长观察，没有他丰富准确的天文观测资料，开普勒再聪明也只能是一个空想家而已。开普勒精于抽象思维，没有他的理论概括，第谷的观察资料也只能是一堆废纸。他们两位一个有明亮的眼睛，一个有聪慧的头脑；一个勤于观测实践，一个精于理论思考。使分析、综合方法在科学上得到一次很成功的应用。

再从物质结构认识过程的发展来看，从汤姆孙模型到卢瑟福模型再到玻尔模型，从科学方法的角度来看，这也是一个有意义的科学综合。因为，所谓综合的方法，就是在思想上把研究对象各部分连结起来，把由分析获得的各个部分、单元、要素的认识复原、综合为对考察对象的整体认识。汤姆孙发现电子以后，卢瑟福根据α粒子散射实验提出核式结构模型，这应算是一次在原子层次上的综合，玻尔为了解决卢瑟福模型的困难又更上了一个层次的综合，但是它还不彻底，还需进一步的工作。

15.1.2 物理学中常用的几种分析方法

定性分析法

所谓定性分析，就是判断性的分析，如判断某种因素是否存在、判断某种事物有何性质等。前面曾经讲过的正电子的发现，其实在安德孙发现正电子以前，约里奥·居里夫妇就曾清楚地在云室中看到过正电子的径迹，但是他们把它理解为向放射源移

来的电子了，其实安德孙的成功就在于他对照片成功的定性分析。约里奥·居里夫妇的失误也就是他们以“想当然”的态度对待，未能进行认真的定性分析而造成的，他们没有认真地想一想向放射源移动的电子究竟来自何方？这使他们继中子发现之后与再次获得诺贝尔奖的机会失之交臂。

定量分析

定量分析就是对事物作数量上的分析。一切事物都是质和量的统一体。事物的质变和量变是紧密联系和相互制约的，所以，对任何事物都必须进行定量分析。从定性到定量，这是物理发展的必然。“定性是定量的不足”这是卢瑟福早就下过的定义。从科学研究来看只有量化才能深化。

哈雷彗星回归是定量分析的一个有力例证。在牛顿以前，人们认为彗星是神秘的星体，牛顿却认为，彗星并不神秘，它同样遵循力学规律。英国天文学家哈雷(E. Halley, 1656—1742)根据牛顿理论进行定量计算，指出1682年再次出现。1943年克雷洛计算了木星和土星对它的摄动作用，指出它下次出现应在1759年。到1759年3月13日人们果真观察到彗星近日点的位置，这件事轰动了全欧洲。

海王星的发现也是一个实例。1781年，英国天文学家赫谢耳(J. Herschel 1791—1871)发现了天王星。以后，人们总是发现天王星的轨道计算结果与实验观察有出入，于是就有人怀疑起牛顿的万有引力定律了。1845年，年仅23岁的剑桥大学学生亚当斯(J. C. Adams, 1819—1892)认为可能有一个未知的行星影响天王星的运动。但是，在茫茫宇宙里，要找到这颗未知的星体，犹如大海捞针一样，是何等的困难！但亚当斯勇敢地面对这个难题，经过两年艰苦的计算，找到了这颗未知的行星，从而证明了天王星运动的“不正常行为”不是万有引力定律不灵，而恰恰是其他一颗未知行星对天王星施加了万有引力的结果。

可惜亚当斯这个无名小辈的看法并未引起权威们的重视，他的计算结果被置之不理。

1846年,法国巴黎天文台的青年天文学家勒维烈(U.J.J. Leveier,1811—1877)独立地计算出这个未知行星的方位,接着德国人伽勒(J.G.Galle,1812—1910)在勒维烈所指示的方位,通过观察很快地发现了海王星。巴黎天文台台长阿拉戈风趣地说:"勒维烈发现这个新的天体,却没有朝天空望过一眼,他在他的笔尖下便看见这颗行星了。"

因果分析法

我们认识物理现象时,必然会遇到现象之间的错综复杂的关系,即现象之间的相互制约和普遍联系,而因果关系则是物理现象间相互制约和普遍联系的主要表现形式之一。

通俗一点讲,定性分析是解决"是什么"的问题,定量分析是解决"有多少"的问题,而因果分析是解决"为什么"的问题。

本书前面介绍过的伽利略的科学推理的理想实验,正确地讨论了"力"和"运动"之间的因果关系,得出了力是产生加速度的原因的结论。

伽利略正确的因果分析为牛顿的动力学奠定了基础。正如爱因斯坦所说的那样:"伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法是人类历史上最伟大的成就之一。"

比较分析法

所谓比较分析,就是确定研究对象之间的差异性和同一性的思维方法。这里所说的"差异性"和"同一性"不是指表面现象,而是指本质上的"差异性"和"同一性"。对于比较分析,我们所要求的是要能看出异中之同、同中之异。物理学研究中的比较分析,就是要在表面差异极大的物理现象中看出它们本质上的共同点,在表面极为相似的物理现象间看出它们本质上的差异点。

运用比较分析,可以对事物进行定性鉴别和定量分析。例如通过光谱的比较分析,可以测定物质的化学成分和含量。1859年,德国科学家基尔霍夫(G.R.Kirchhoff,1824—1887)首

先用这个方法，确认太阳上含有地球上常见的化学元素。

运用比较分析，还可揭示出不易直接观察到的运动和变化。例如，恒星在短时间内的运动是不易直接观察到的，因此，长期以来被人们误认为是永恒不动的星体。但是，1718 年，哈雷将他在圣赫勒纳岛所作的观测，同一千多年前古希腊天文学喜帕恰斯(Hipparchus,？—127BC)与托勒密所作的观测相比较，看到了 4 个恒星(毕宿五、天狼、大角、参宿四)的位置有明显差异，因而发现了恒星的运动。又如，人们根据海王星轨道的摄动现象，由万有引力推出海王星以外还可能存在一颗行星。但经过几十年的观察，这颗行星一直没有找到。直到 1930 年 3 月 13 日，才由美国天文学家汤波(C. W. Tombaugh)运用比较分析法发现。汤波首先对天空中可能发现行星的区域进行了缜密的搜索，拍下照片。然后，将相隔几天所拍的两张星空照片进行详细比较，结果发现照片上某一个点的位置有了明显的改变，因而确定了这个光点就是所要找的那颗行星——冥王星。

元过程分析法

在物理学研究中，有一种特有的分析方法——元过程分析法，也叫做“微元法”。它是把研究对象分割为无限多个无限小的部分，或把物理过程分解成为无限多个无限小的部分，抽取其中一部分加以研究的方法。

比如，从有一定质量分布的刚体内部抽出一个非常小的质量元进行研究，通过分析这些小单元的局部运动中各物理量之间的关系和变化规律，建立描述整个物理过程的运动方程。有了这个方程，不仅可以求出物理过程在某一特定条件下的瞬时状态，而且可以把握整个物理过程的运动变化趋势和特点。

分析与综合是人类认识事物的两种思维方式。人们对物理世界的认识，也是经历了以分析为主和以综合为主的两种过程。在物理学发展初期，人们对物理现象、规律的认识是零碎的、分散的、孤立的和局部的。随着认识水平的提高，人们找到了各种

物理现象、物理规律之间的相互联系，逐步把物理学的研究推进到以系统、综合为主的阶段。在物理学发展中有三次伟大的综合，这就是：17 世纪牛顿力学的建立，19 世纪能量守恒及转化定律的建立，以及 19 世纪麦克斯韦电磁场理论的建立。

科学的发展是沿着“分析—综合—再分析—再综合……”的轨迹前进的。

15.2 归纳与演绎

牛顿曾说过：“在实验物理学上，一切定理均由现象推得，用归纳法推广。”爱因斯坦也认为：“运用于科学幼年时代的以归纳为主的方法，正让位于探索性的演绎法。”

15.2.1 归纳和穆勒五法

归纳法就是一种从个别事实中概括出一般概念、一般规律的思维方法。它是一种推理形式，运用归纳法进行推理时，可以分为三个基本步骤：

第一步：搜集材料。一般说，搜集的材料越多、越全面，推出的普遍结论越可靠。

第二步：整理材料。从自然界和实验所获得的材料，往往是纷杂繁多的，难以直接洞察内在所蕴含的规律性。英国著名哲学家培根(F. Bacon, 1561—1626)在谈到归纳法时曾说过：“……我们如果不把它(指材料——本书作者)归类在适当的秩序以内，则它一定会使人的理解迷离恍惚起来。”整理从观察和实验所得到的材料，这是归纳法极为重要的一步。

第三步：概括抽象。通过对材料进行比较、分析，剔除其非本质的成分，把事物的本质因素及其内在规律揭示出来。

归纳法也是人们认识自然、研究自然的一种古老的方法。古希腊哲学家苏格拉底(469—399 BC)所提出的著名的问答法

中，已有归纳的含义。不过，他的这种归纳只是简单地从许多个别事物中找出它们的共性，这种归纳法还没有科学的地位。现代归纳法是培根提出的，他断言："人类在认识过程中必须从因果联系、从分析个别事物、现象出发，任何可靠的真理都必须以大量的事实为根据，通过对大量事物的比较，就可能使单一的、个别的东西上升到一般，上升到结论。"

归纳法可分为完全归纳法和不完全归纳法两类。前者是从所有个别对象的全部总和中归纳出一般结论的方法；后者则是在没有列举全部对象，得出结论后再推理的方法。这种方法又可分为简单枚举法和科学归纳法。由于简单枚举法不能保证在没有考察的对象中不出例外，因而可靠性不强。但作为一种初步探索的方法，或作为提供假说的方法，在初步研究中仍有其作用。

在不完全归纳法中，根据某类事物的部分对象的本质分析，找出它们的内在联系，推出该事物的一般性结论，称为科学归纳法，它是优于简单枚举法的一种不完全归纳法，其结论是可靠的。

在不完全归纳法中，还有一种对科学十分有用的方法，叫判明因果关系的归纳法，这些方法包括：契合法、差异法、契合差异并用法、共变法和剩余法。因为这些方法是英国著名逻辑学家和哲学家穆勒(J. S. Mill, 1806—1873)总结的，因此称为穆勒五法。

契合法

如果所研究的现象在两个或两个以上的场合中，只有一个情况是共同的，那么，这个共同情况就与所研究的现象之间有因果关系。

我们用 A、B、C、D、E、F、G 分别代表不同的情况，σ 是我们所要研究的现象，契合法可用下图表示：

	情况		现象
场合(1)	A、B、C	——	σ
场合(2)	A、D、E	——	σ
场合(3)	A、F、G	——	σ
⋮			

所以,A 与 σ 之间有因果关系。

但是,契合法也不是一种绝对有效的方法,这是因为:① 在我们观察到的几个具体场合下出现的那个共同情况,也可能与我们所研究的现象毫无关系;② 在我们观察到的几个具体场合中的那些不同的情况,经过进一步的分析以后,可能都包括着一个共同因素,而这个共同因素恰恰是我们所研究的现象产生的原因。

例如,18 世纪意大利的生物学家兼医生伽伐尼(L. A. Galvani, 1737—1798)看到,当助手的解剖刀碰到死去的青蛙腿暴露在外的神经时,蛙腿竟然猛地抽动了一下。他对此十分感兴趣,经过研究,提出了"动物电"的观点——动物体内可以产生一种电流,它是蛙腿抽搐的原因。他为什么作了如此分析呢?因为 1715 年法国的阿当松(M. Adandon, 1727—1806)在研究电鱼时曾被击昏,醒来后,他把"电鱼"与当时已发明的莱顿瓶联系起来了,他认为动物体有电。这样,伽伐尼就把蛙腿的抽搐归咎为生物电了,伽伐尼也曾决定重复做实验,以究原因。

起初,伽伐尼用铜钩与铁窗相连,他发现无论是晴天或雨天做实验,被铜钩勾住的青蛙的腿在碰到窗子的铁栏杆时都发生痉挛。他联想起美国的富兰克林(B. Franklin, 1706—1790)的风筝实验,认为雷雨天大气中的电可以在蛙腿中储存起来,然后在晴天又释放出来。这个结论对不对呢?他决定在一个封闭的实验室中重复这个实验,结果发现:当他在室内把青蛙放在实验台的铁板上,用铜丝去触蛙腿时又发生了痉挛,这就排除了是大

气电使蛙腿抽动的原因。1792 年，他在“论肌肉运动中的电力”一文中，描述了他所做的实验：“我选择了不同的时辰，用各种不同的实验重复多次，但结果都是相同。只是在使用某些金属时，蛙腿的肌肉抽动得更加强烈而已。”

于是，伽伐尼提出了“动物电”的观点，他在上述文章中说：“类似的结果使我感到很惊奇，于是我猜想：动物有电。我感到，发生这种现象时，好像有一种流质由神经流向肌肉，并且像莱顿瓶里那样，形成一个链。”他最后得出一个结论：“根据我们至今所了解和研究过的一切，我认为完全有理由可以肯定，动物具有电，我们可以将其称为‘动物电’。”

其实，伽伐尼对蛙腿痉挛这一现象作了错误的因果分析，他误用了“契合法”。他为了寻找蛙腿痉挛的原因，分析了蛙腿痉挛现象出现的各种场合究竟存在着一种什么共同的情况(这些共同的情况就是蛙腿痉挛的原因)。经过分析，他只找到一个共同情况——动物电的存在。于是，他根据“契合法”得出结论：生物电是蛙腿痉挛的原因。其实，伽伐尼忽视了一个重要的细节：只有当他用不同的金属接触时，例如用铜钩戳穿蛙腿而接触到铁板时，蛙腿才会发生痉挛。在“生物电”这样的传统观念束缚下，像伽伐尼这样优秀的实验家也失去了做出重要发现的机会。

对伽伐尼“生物电”的观念持不同意见的科学家，更加深入地探讨了这个问题。意大利的自然哲学教授伏打(C. A. Volta, 1745—1827)决心检验一下蛙腿的抽动是不是“生物电”引起的。当他用当时已知的方法获得的电流通过青蛙的肌肉时，发现像伽伐尼所看到的一样，蛙腿也会发生抽搐。于是他得出结论：青蛙的神经反应是被动的，它只是像一台“仪器”，反映了电流的通过，而不是电流产生的原因。那么，在伽伐尼实验中，电是从哪里来的呢？他决定越过伽伐尼的原始实验去寻求答案。他猜想，可能是两种不同的金属接触时产生了电。

为此，伏打从 1872 年起，花了整整 3 年时间，用各种金属搭

配成一对一对，做了许多实验。通过实验，将不同金属排成序列：锌、锡、铅、铜、银、金……（这就是著名的伏打序列）。他发现，只要按这个序列，将前面一种金属与后面一种金属接触在一起，前者就带正电，后者带负电，无一例外。伏打就这样找到了蛙腿抽搐的真正原因——不同金属的接触电位差引起电流，而青蛙肌肉仅是通电导体而已。从思维方法的角度看，伏打对伽伐尼实验进行了正确的因果分析。

差异法

如果所研究的现象出现的场合与它不出现的场合之间，只有一点不同，即在一个场合中有某个情况出现，而在另一个场合中这个情况不出现，那么，这个情况与所研究的现象之间就有因果关系。

差异法可用下式表示：

	情况		现象
场合(1)	A、B、C	——	σ
场合(2)	- B、C	——	-

所以，A 与 σ 之间有因果关系。

在场合(1)中，原因 A 出现，所研究的现象 σ 也出现，场合(1)叫正面场合；在场合(2)中，原因 A 不出现，所研究的现象 σ 也不出现，场合(2)叫做反面场合。

光电效应的发现是差异法应用的最好的实例。

最早发现光电效应现象的是德国科学家赫兹。赫兹用实验的方法证实了电磁波的存在。如图 15.1 所示，赫兹调节感应圈使小铜球 M_1、M_2 间产生火花。调节探测器两铜球 M_3、M_4 的相对位置，在某一位置时，M_3、M_4 间也产生了明显的火花。这说明了振子产生的电磁波在探测器中引起了电谐振。赫兹无意中发现，当 M_1、M_2 间火花产生的光照射到 M_3、M_4 间隙上，M_3、M_4 间火花放电就容易些；若把 M_1、M_2 间火花产生的光与

M_3、M_4 间隙隔开,则 M_3、M_4 间放电就比较困难。而且,赫兹还发现,引起 M_3、M_4 间隙放电容易的光是紫外线。他当时无法解释这些现象,只是如实地作了记叙。

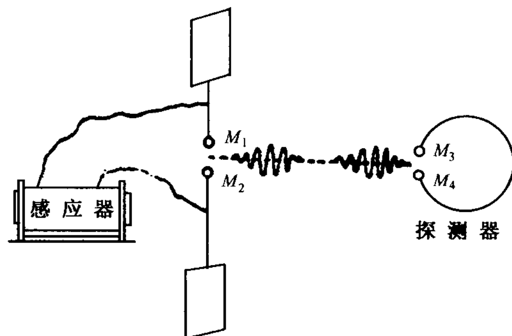


图 15.1　赫兹实验示意图

1889 年,海华兹(W. Hollwachs, 1859—1922)做了一系列实验。他用碳弧光照射绝缘的锌板(锌板连接验电器)发现,如果锌板原来带负电,经照射后会迅速失去电荷;若在碳弧前面用一块玻璃隔开,则现象消失。说明起作用的确实是紫外光,从锌板放出来的肯定是负电荷。

仔细分析一下海华兹的思维过程,就会发现他使用的是"差异法"。这里,正面的情况是紫外线照射(A、B、C…),反面情况是无紫外线照射(B、C…)(玻璃吸收了碳弧光的紫外部分),而正面情况下出现的现象是失去负电荷(σ),反面情况下出现的现象是不失去负电荷。因此,A 是 σ 的原因。即紫外线的照射是失去负电荷的原因。

差异法比契合法有较大的可靠性,因为:

(1) 在差异法中不仅有正面场合,而且有反面场合;

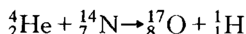
(2) 在差异法中,除了在正面场合有某种情况与在反面场合没有这种情况外,其他情况是完全相同的。

但是,应用差异法也可能产生错误。应用差异法时,要求正面场合与反面场合只有一点不同。如果在正面场合中还有其他

在反面场合中没有的情况，而这一情况又被忽略了，那么就会产生错误。下面介绍一个例子，供读者参考。

劳伦斯是美国著名的科学家，他以发明回旋加速器为科学作出了重大的贡献。

1919年，英国科学家卢瑟福用α粒子轰击氮原子核，得到氧的同位素，从而实现了人类历史上第一次人工核转变。其反应式如下：

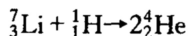


$${}_{2}^{4}\mathrm{He}+{}_{7}^{14}\mathrm{N}\rightarrow{}_{8}^{17}\mathrm{O}+{}_{1}^{1}\mathrm{H}$$

由此，人们认识到：粒子可以轰开原子核的大门，而且意识到，如果加速粒子，使之获得更高的能量，则高能粒子可以更容易地轰开原子核的大门，可以在核物理领域内取得更大的成就。

这种需要激励着物理学家们设计各种加速器，使带电粒子在电场中获得加速。

1932年，考克拉夫特(J. D. Cockcroft, 1897—1967)与沃尔顿(E. T. Walton)发明了静电加速器，在卡文迪什实验室里以人工加速的粒子实现了核转变。他们用77万伏高压加速质子，使锂7的原子核发生分裂，产生两个α粒子：



$${}_{3}^{7}\mathrm{Li}+{}_{1}^{1}\mathrm{H}\rightarrow 2{}_{2}^{4}\mathrm{He}$$

这是第一次由人工加速的粒子引起的核反应。

但是，靠静电加速器获得更高能量的粒子是困难的。因为要获得更高的能量，就需要更高的电压，这在技术上会带来极大的困难和危险。

劳伦斯采取了一个非常聪明的办法，制成了回旋加速器，其基本结构如图15.2所示。在恒定的磁场中放置两个D形盒，并接上高频交变电压，在空隙中产生交变电场。带电粒子就可以在电场力作用下被加速，在磁场力作用下回旋，最后待积累到很高的能量时被引出。

这样，仪器中的电位差与一次加速的电位差相比，就微乎其微了。劳伦斯的发明，具有不可估量的技术价值。

第一个回旋回速器直径只有几英寸，粒子在其中回旋的玻璃真

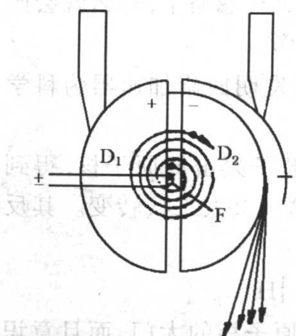


图 15.2　回旋加速器

空室可以放在一只手掌中。以后加速器规模逐渐扩大,到 1936 年,劳伦斯制成了一台直径 37 英寸的回旋加速器,它可以产生强放射性同位素源了。

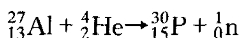
劳伦斯和其他一些物理学家们不同,尽管他也用回旋加速器进行一些核物理研究,但他的主要兴趣在于改进加速器的性能,开发新的机器,这也确实是他所擅长的领域。也许正因为如此,他也非常遗憾地失去一次重大发现的机会。

正当劳伦斯以他的加速器制造比约里奥·居里夫妇强几千倍的放射性物质时,约里奥·居里夫妇却还在用天然放射性源轰击着原子核。劳伦斯的条件比约里奥·居里夫妇不知道要好多少倍,但做出人工放射性这一伟大发现的,却不是劳伦斯,而是约里奥·居里夫妇。1934 年,约里奥·居里夫妇在用 α 粒子轰击铝箔时,除探测到预料的中子外,还探测到了正电子(正电子是物理学家们在 1932 年发现的,它的质量跟电子相同,带一个单位的正电荷,符号是$^{0}_{1}e$)。使人感到意外的是,拿走 α 放射源以后,铝箔虽不再发射中子,但仍继续发射正电子,而且这种放射性随着时间衰减的规律与天然放射性一样,也有一定的半衰期。

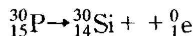

约里奥·居里
(1900—1958)


伊伦·居里
(1897—1956)

原来，铝箔被 α 粒子击中后发生了如下反应：

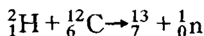


反应生成物 $^{30}_{15}P$ 是磷的一种同位素，它有放射性，像天然放射性一样发生衰变，放出正电子。$^{30}_{15}P$ 的衰变反应可写成



这是人类历史上一次伟大的发现——第一次用人工的方法获得了放射性元素。

1934 年 1 月，约里奥·居里夫妇在发表的文章中写道："概括起来说，现在第一次可以利用一种外源，使某些原子核具有放射性。这种放射性在激发它的辐射源撤离后，仍可持续一段时间。类似我们观察到的寿命长的放射性的 $^{13}_{7}N$ 的原子核，就可以用氘核轰击碳放出一个中子后产生出来。"该反应式为



一个多月以后，劳伦斯看到了这篇文章，立刻明白了自己实验设计中存在的缺陷，让本来可以属于自己的伟大发现从眼皮底下悄悄地溜走了，他是多么地后悔啊！

劳伦斯在实验设计上究竟存在什么缺陷呢？原来劳伦斯为了加快实验速度，把回旋加速器和盖革计数器（一种常用的探测放射性辐射的仪器）共用了一个开关。这样，劳伦斯当然不能知道当回旋加速器关闭后，放射性现象仍然存在，计数器仍然可以计数。但作为探测仪器的计数器因无电源而无法计数，从而使劳伦斯和他的同事们都认为不存在放射现象了。

从思维方法的角度看，劳伦斯实在是一个不高明的研究者。本来"差异法"是一个判别因果关系的很有用的归纳法，劳伦斯应该把回旋加速器和盖革计数器两个开关分开。在开启回旋加速器（使放射源发出的粒子轰击碳核）时和关闭回旋回速器（撤走放射源）后，观察计数器的变化，用"差异法"去分析"有放射源"和"撤走放射源"两种情况下出现的不同现象，这样自然就可以发现人工放射性了。

而现在，劳伦斯把两个开关合二为一。开关接通时，计数器

有反应(正面场合);开关关闭后,计数器无反应(反面场合)。而反面场合与正面场合相比,发生了两个变化:加速器、计数器均停止工作,因此,无法判断计数器无反应是由加速器停止工作引起的呢,还是由计数器停止工作引起的。劳伦斯在这里违反了"差异法"判断因果关系的一个原则——正面场合与反面场合相比,只能有一点不同,否则就无法判断因果关系。

看了约里奥·居里夫妇的文章后,劳伦斯立即改变接线线路,让回旋加速器和盖革计数器各自独立工作,然后,把一块碳靶放在粒子流必经之处。当回旋回速器运转了一会儿停止后,盖革计数器还在"喀哒! ……喀哒! ……喀哒!"地响个不停。正如约里奥·居里夫妇所预言的那样,$^{13}_{7}N$ 竟如此容易地出现了!

劳伦斯的学生与助手利文斯顿(M. S. Livingston)说:"这个喀哒、喀哒的声音,当时在场的每一个人是不会忘记的。"另一位助手摇头叹息着:"我们都是一群傻瓜! 我们早就应该轻而易举得出这一发现!"的确如此,一年多以来,他们经常轰击碳,但由于线路的失误,居然轻而易举地把这个可以获得诺贝尔奖的发现让约里奥·居里夫妇在条件差得多的情况下夺走了。利文斯顿悔恨地说:"我们当时真想打大家的屁股!"

由此例可以看出,尽管条件很差,有了正确的思想方法照常能干出优异的成果来。

契合差异并用法

如果在出现所研究现象的几个场合中,都存在一个共同的情况,而在所研究的现象不出现的几个场合中,都没有这个情况,那么,这个情况与所研究的现象之间就有因果关系。

这一方法可以用图示表示如下:

	情况		现象
正面场合	A、B、C	——	σ
	A、D、E	——	σ
	A、F、G	——	σ

	情况		现象
反面场合	— H、J	——	—
	— J、K	——	—
	— L、M	——	—
	…		

所以，A 与 σ 之间有因果关系。

自从 1870 年 7 月奥斯特(H. C. Oersted, 1777—1851)发现了电流的磁效应后，人们一直注意着把磁(变化的磁)变为电的问题。在本书的第七讲已经讲了不少，现在结合方法问题再补充讨论一些问题。

法拉第把产生感应电流的情形概括为五类：① 变化着的电流；② 变化着的磁场；③ 运动着的稳恒电流；④ 运动着的磁铁；⑤ 在磁场中运动着的导体。他正确地指出感应电流与原电流的变化有关，而与原电流本身无关。法拉第把上述现象定名为“电磁感应”。

法拉第分析了自己做的许多实验，发现凡出现电磁感应现象的情况下，都是在闭合的线圈中磁力线的通量发生了变化；凡是不产生电磁感应现象时，通过闭合线圈的磁力线的通量并不变化，而电磁感应现象的强弱，取决于磁通量变化的剧烈程度。为此，他总结出电磁感应现象的规律——“不论金属线是沿直线还是沿斜线作切割磁力线运动，也不论是向这个方向还是那个方向运动，电动势的总量可由被切割的磁力线条数来表示。”也可以说，感应电动势正比于每秒钟被金属线切割的磁力线条数(即正比于磁通量的变化率)，这就是电磁感应定律的定量化的最基本的表达式。

从思维方法的角度看，法拉第总结电磁感应定律，是用了契合差异并用法，即凡有电磁感应现象出现的场合(正面场合)，都存在磁通量变化的情况；凡无电磁感应现象出现的场合(反面场合)，都无磁通量变化的情况。因此，磁通量的变化是产生感生电流的原因。

共变法

如果每当某一现象发生一定程度的变化时，另一现象也随之发生一定程度的变化，那么，这两个现象之间有因果关系。

设 A_1、A_2、A_3…是现象 A 的不同状态，σ_1、σ_2、σ_3…是另一现象 σ 的不同状态。共变法可用图表示如下：

	情况		现象
场合(1)	A_1、B、C	——	σ_1
场合(2)	A_2、D、E	——	σ_2
场合(3)	A_3、F、G	——	σ_3
⋮			

所以，A 与 σ 有因果关系。

例如，法国物理学家盖吕萨克(Gay-Lussac, 1788—1850)根据多次实验发现：一定量的气体在压强不变的情况下，温度增加其体积也随之增加，体积与其绝对温度成正比；反之，体积随温度的减小而减小，这就是著名的盖吕萨克定律。英国的物理学家玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)和法国物理学家马略特(E. Mariotte, 1620—1684)各自独立地发现：一定质量的气体，在温度不变的情况下，如果气体压强增大则体积变小；反之，若气体压强变小则体积增大，这就是著名的玻意耳定律。

像盖-吕萨克定律这样，一个量随另一个量的增加而增加的共变关系称为同向共变；像玻意耳定律这样，一个量随另一个量的增加而减小的共变关系称为异向共变。当然，也有这样的情况——既是同向共变，又是异向共变。如果原因作用量一直在增加，其结果量在一定的时间、地点、场合下增加；而越过某转折点以后即减小，反之亦然。例如，斜抛物体的运动射程，在初速度不变的条件下，起初，随抛射角的增大而增大，越过 45°以后，则随抛射角的增大而减小。在这种情况下，必须找出同向共变向异向共变转折的转折点，才能真正弄清因果关系的内在规律。

在应用共变法时，往往是固定某一个因素作单因素变化，但是必须要注意到有无其他因素这时也在变化，这种变化对我们本来因素变化引起结果的影响如何。

前面讲过的3种方法，即契合法、差异法、契合差异并用法，都是从情况出现与不出现来判明因果关系的。共变法却是从现象变化的数量或程度来判明因果关系的。因此，在应用共变法时是可能度量的、可以得出表示原因和结果的两个量之间的函数关系，因而共变法有较大的可靠性。

共变法还有一个优点，就是当有些现象无法消除(或不易消除)时，我们研究这些现象之间的因果关系时，显然是不能用差异法，因为差异法要求消除这些现象。当不能消除(或不易消除)的现象比较多的时候，甚至不能使用契合法。但是，在上述情况下，我们却可以应用共变法，使那些不能消除或不易消除的现象发生数量上的变化，从而判明它们之间的因果关系。

剩余法

如果已知某一复合现象是另一复合现象的原因，同时又已知前一现象中的某一部分是后一现象中的某一部分的原因，那么，前一现象的其余部分是后一现象的其余部分的原因。

剩余法可表示如下：

A、B、C、D 是 a、b、c、d 的原因；

B 是 b 的原因；

C 是 c 的原因；

D 是 d 的原因；

所以，A 是 a 的原因。

1896年，贝可勒尔(H. A. Becquerel, 1852—1908)发现了铀的放射性现象，但并未引起整个科学界的关注，因为贝可勒尔的研究仅仅局限于铀，因此，以后的进展也不大。正当放射性研究处于徘徊不前的状况时，居里夫妇却以极大的热情投入到这个领域的研究中去。

居里夫人猜想，是否除铀以外还有什么元素也具有放射性？

它利用居里(Pierre Curie, 1859—1906)制作的象限静电计进行了精密的电流测量,发现除铀以外,钍也有放射性。

居里夫人用放射线引起空气电离的强弱程度来度量放射性的强弱,发现了一个重要规律:铀或钍的化合物的放射性强度只与化合物中铀或钍的含量成比例,所含的铀或钍越多,放射性就越强,与它的化合情形及物理状态毫无关系。因此,居里夫人得出结论:放射性是原子的一种特性。

居里夫人进一步检验了各种矿物的放射性强度,发现一些沥青铀矿的放射性要比纯粹的氧化铀强烈 4 倍之多。起初,居里夫人怀疑自己是否测量错了,但经过反复实验,结论是相同的,这使得她相信这个结论是可靠的。为了解释这种现象,她设想:除了铀以外,这些矿物中,必定还有一种新的放射性元素存在,其放射性能力比已知的铀或钍要强得多。

在这里,显然居里夫人应用了“剩余法”:放射性元素的存在是产生射线的原因,而铀是产生一部分射线的原因,则另一部分放射线一定是由某种尚未测知的放射性元素引起的。

为了寻找这种稀罕的元素,居里夫人废寝忘食、昼夜不停地工作,终于从一二百公斤的原料中提炼出几十克的与硫化铋相混合的东西,再将硫化铋在真空中加热到 700℃,找到了升华物,它的放射性比铀强 400 倍! 于是,居里夫妇在 1898 年 7 月 18 日向法国科学院报告了新元素的发现,出于对祖国深沉的感情,他们说:“假使这新元素的存在将来能证实的话,我们想叫它‘钋’用以纪念我俩中一人的祖国——波兰。”

几个月以后,居里夫人又用类似的方法发现了放射性比铀要强 900 多倍的另一种元素——镭。短短的几个月内,居里夫妇发现了两种新元素——钋和镭,引起了物理学界的轰动。为了提炼出纯的镭,居里夫妇从 1899 年至 1902 年花了整整 3 年半的时间,终于分离出了 0.12 克(g)纯氯化镭,测出了镭的原子量为 225,放射性比铀强 200 多万倍。他们又花了 3 年功夫,提炼出金属镭,使科学界对镭的存在深信不疑。

人们在研究物理规律时，往往不是仅用一种判断因果关系的归纳法，而是综合使用几种归纳方法。前面，我们已经介绍过物理学家们如何应用"差异法"发现光电效应的，下面我们再看一看物理学家们又是用什么方法来研究光电效应规律的。

光电效应规律的研究主要是由德国的物理学家勒纳德(P. Lenard, 1862—1947)完成的。早在 1889 年，他就开始做一些简单的光电效应实验。1897 年，J. J. 汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940)发现电子以后，勒纳德在 1902 年证明了光电效应中发射的负电荷是电子，他还做了一系列实验，从实验中找寻光电效应的规律，其装置如图 15.3 所示。当入射光射到清洁的金属表面(阴极 C)时，就有电子发射出来，若有些电子射到阳极 A 上，外电路就有电流通过。阳极相对于阴极的电势可正可负，以使达到阳极的电子数增加或减少。

图 15.4 表示两种程度不同的同频率的单色光 a 和 b 照射到阴极 C 上，测得的电流与电压的关系图线。改变电压 U，光电流大小随之改变，这里是用"共变法"研究电压、电流的因果关

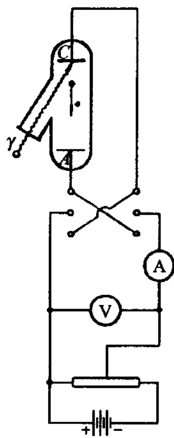


图 15.3 光电效应实验

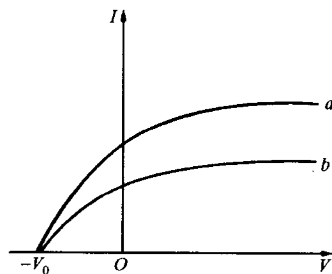


图 15.4 光电流 I 与电压 V 的关系

系。电流随电压的增大而增大,这是一种“同向共变”的关系;当电压足够大时,电流达到饱和,其值不变,这种“共变关系”结束。

但不同的入射光强对应不同的饱和电流,饱和电流的大小与入射光强成正比——这是勒纳德发现的又一种“共变关系”。

勒纳德又创造了一种测光电子最大初速度的方法,他对电路加反向电压(即遏止电压 $-V_0$),使光电流为零。发现不同强度的同种频率的单色光,其遏止电压相同,即电子逸出的最大初速度相同,他发现了入射光频率与遏止电压有因果关系。这里,勒纳德又应用了“契合法”。两次实验中有一种情况相同(入射光频率同),出现了同一现象(遏止电压相同),因此,入射光频率与遏止电压有因果关系。人们正是通过遏止电压的测量去推算入射光频率的(关于这一点,本书前面已作过解释了)。勒纳德发现的这些因果关系,用经典理论是无法解释的:① 按经典理论,当光强增大时,作用在电子上的力也增大,因此光电子的初动能也应增大,但事实是光电子的初动能与入射光强无关而仅与频率有关。② 按照经典理论,光是一种电磁波,其能量是连续的。当入射光不太强,只要有足够长的时间积累,电子也能达到一定的能量而逃逸金属表面。但事实并非如此,当频率低时,不论照射多久,电子也无法逸出金属表面。

本书的第八讲中讲述的爱因斯坦光量子假设就是在这些方法的指导下应运而生的,图 15.5 是遏止电压与频率的关系图形。

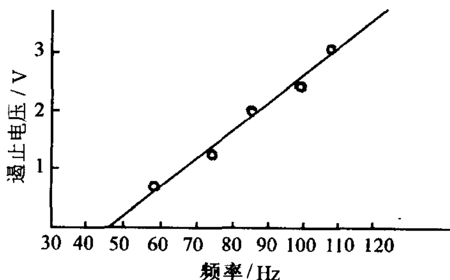


图 15.5 遏止电压与频率的关系

归纳法在科学认识中所起的作用，一直为许多著名的科学家所推崇。

牛顿说："在实验中各个定理都是从现象中推论出来的，然后再通过归纳而成普遍的原理。"爱因斯坦也说过："科学家必须在庞杂的经验事实中，抓住某些可用精密公式来表示的普遍特征，由此探求自然界的普遍真理。"归纳法正是从经验事实中找出普遍特征认识方法，即从个别到一般的方法。它能使科学家们从经验事实中找出一般的规律。即使是实验事实不多，也可以从这些少量事实的考察中看出一些真理的端倪，给予人们一些启迪，使人们能提出假设和猜想。尤其是在科学实验中，人们为了寻求因果关系必须恰当地安排实验，使之合理有效。这时应用穆勒五法，利用一些因果关系去设计实验，则是非常奏效的。

当然，归纳法也不是万能的，它带有很大的或然性，因为它常常会局限于经验的、表面的、现象的反映之中，尤其他是以人们的直观感觉为基础的，因此在揭露事物本质上就不可能深刻。

15.2.2 演绎法

前面谈到的是由特殊到一般的归纳法，现在介绍一个由一般到特殊的演绎法。

和归纳法相反，演绎是从一般到个别的推理方法。作为出发点的一般性判断称为"大前提"，作为演绎中介的判断称为"小前提"，把由"大前提"和"小前提"推演出来的结果称为演绎的结论。演绎推理的主要形式就是由大前提、小前提、结论组成的"三段论"。

下面介绍一个演绎法应用得很好的小故事。

法国的动物学家居维叶（G. B. Cuvier, 1769—1832）的一个顽皮学生一次曾装扮成一个怪兽去吓唬午睡的居维叶，他被吵醒后，睡眼惺忪中看到一只"怪兽"，正在把有角的头以及两只蹄子伸进卧室窗口，还不时发出怪叫声，一副张牙舞爪的样子。居

维叶定眼一看，然后又满不在乎地继续入睡了。那个装成怪兽的学生很惊奇："老师并不知道我在恶作剧，可他为什么不怕呢？"事后带着这个问题，他请教了老师。居维叶说："有蹄有角的动物都是食草动物，不是食肉动物，我才不怕呢！"实际上，居维叶在定眼看"怪兽"时，心中已作了演绎推理，已完成了两个"三段论"：

(1) 大前提：凡有蹄有角的动物是不吃人(不食肉)的动物；
小前提：我见到的是有蹄有角的动物；
结论：我遇见的动物是不吃人的。
(2) 大前提：不吃人的动物不必害怕；
小前提：我见到的是不吃人的动物；
结论：我不必害怕。

演绎法是逻辑证明的很好的工具。

如果选择确实可靠的命题作为大前提，经过合乎逻辑的推理，得到的结论就一定是正确的。因此，演绎推理是一种必然性的推理，这个特点在几何学中表现得极为突出。爱因斯坦甚至说："如果一个人初次接触欧氏几何学而不曾为它的严密的逻辑性所感动的话，那他是不会成为一个出色的理论科学家的。"

演绎推理也是作出科学预见的一种手段，若把一般性的原理(理论)运用到具体场合，作出正确的推论来，这就是科学预见。由于科学理论是已被实践证明了的真理，由此作出的推论就是有科学根据的，我们才可称之为科学预见。

归纳法和演绎法是非常辩证的，这二者之间既有区别又有联系，归纳法是有偶然性的，前提和结论并无必然联系；而演绎法则是有必然性的，其前提和得出的结论则是有必然联系的。归纳法是从个别到一般，演绎法则是从一般到个别。在结论范围方面，归纳法的结论范围超过前提范围是可以的，而演绎法结论范围则不可能超过前提范围。

当然，演绎是以归纳为基础的，归纳又是以演绎为指导的，没有演绎指导，归纳往往要失败，所以归纳和演绎互为条件，互

相渗透，在一定的条件下互相转化。杨振宁从他亲身经历认为中国缺乏实验手段，实验结果少，演绎型的训练多，而在美国从大量实验结果中构造新模型，提出新观点，归纳出新物理定律的训练多。

15.3 类　　比

类比是一种逻辑推理，也是抽象思维中的一种基本形式。它通过联想，把异常的、未知的事物(研究对象)对比寻常的、熟悉的事物(类比对象)，然后依据两个对象之间存在着的某种类似或相似的关系，从已知对象具有的某种性质推出未知对象具有相应的一种性质的方法。

15.3.1 类比推理的两个基本环节

选择类比对象

类比推理是以两个对象的比较为基础的，因此必须根据研究目的，从研究方法、形成结构、功能特征、因果联系等方面的相似之处出发，选择熟悉的、生动直观的事物作为类比对象。

进行类比推理

即通过比较，展开联想。其一般形式。如下：

对象 X　有属性 a、b、c、d

对象 X'　有属性 a'、b'、c'

推理：对象 X'可能也有属性 d

如果我们借用数学上的比例结构来表示这种经推理的思维操作的话，可表示成如下的形式：

$$X(a):X'(a')\longrightarrow X(b):X'(b')?$$

这就是说，如果对象 X 有属性 a，对象 X'有属性 a'，则对象 X 有属性 b 时，对象 X'也可能有属性 b'。既然对象 X 有(a，b，c，d)属性，X'有(a'，b'，c')属性，开展联想，类比 X'中应有 d'属

性。

历史上还有一段用类比促成原子弹研制成功的佳话。1939年，铀核裂变被发现后，世界上许多科学家认识到核分裂所释放的巨大能量，担心被德国纳粹政府用以制造大规模的杀伤武器。两位流亡到美国的匈牙利物理学家西拉德和维格纳（E. Wigner）找到爱因斯坦，希望借助爱因斯坦崇高的国际威望写信给当时的美国总统罗斯福，提醒总统注意到纳粹政府将裂变理论用于军事目的的危险，敦促美国赶在德国之前造出原子弹。爱因斯坦表示完全赞同，并于1939年8月签发了给美国总统的信件。1939年10月，总统的私人顾问萨克斯向总统面呈了这封著名的万言书。开始的时候，罗斯福总统看不懂那艰深生涩的科学论述的内容，不能注意到问题的严重性，反应冷淡，想婉言推辞。这位知识渊博、机智超群的顾问就利用与总统共进早餐的机会，给罗斯福讲起了历史上拿破仑的一个故事：英法战争时，曾经在欧洲大陆上不可一世的拿破仑却在海战中屡屡失败。当时有一位年轻的美国发明家富尔顿（R. Fulton, 1765—1815），向拿破仑建议将法国的战船砍掉桅杆，撤去风帆，装上蒸汽机，将木船换成钢舰。可拿破仑却想，船没有风帆怎能航行，木板换成钢板，船哪能不沉没。拿破仑眉头一皱，把富尔顿一下轰了出去。史学家后来评论这一段历史时认为，如果当时拿破仑冷静下来稍微慎重考虑这一建议，那么19世纪的世界史也许就得重写……罗斯福听完了这则历史故事，猛然醒悟了，沉思了片刻，取出了拿破仑时代的法国白兰地酒，斟满杯子，敬重地递给萨克斯，高兴地说："你胜利了。"后来，罗斯福总统就下令成立了铀顾问委员会，部署了代号为"曼哈顿工程"的制造原子弹的庞大计划，美国最终于1945年抢先制造了世界上第一颗原子弹。这里，萨克斯运用了拿破仑不听从富尔顿建议使他在海战中受重创的史实旁敲侧击地比喻了研制原子弹的重要意义，使罗斯福总统深受教益。

当然，我们更应注意类比在科学认识中的作用，麦克斯韦

说："借助这类比，我试图以便利的形式提出研究电现象所必须的数学手段和公式。"爱因斯坦也认为："在物理学上往往因为看出了表面上互不相关的现象之间相互一致之点而加以类推，结果竟得到很重要的进展。"

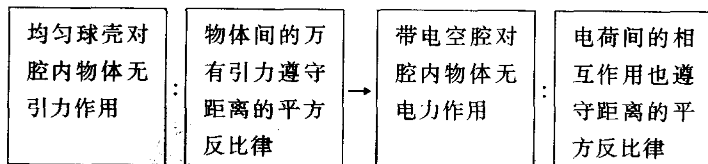
15.3.2 类比在科学认识中的作用

类比是提出假设的重要途径

物理学上有许多重要理论，都是先从类比法提出科学假设，然后经过实践检验，发展成为科学理论的。

根据类比推理提出假设有一定的主、客观因素。主观上，人们总是习惯于用已知的图景去设想、解释未知的图景；客观上，物理世界中各种现象和过程之间的互相联系或多或少有些相似，又为类比提供了事实基础。

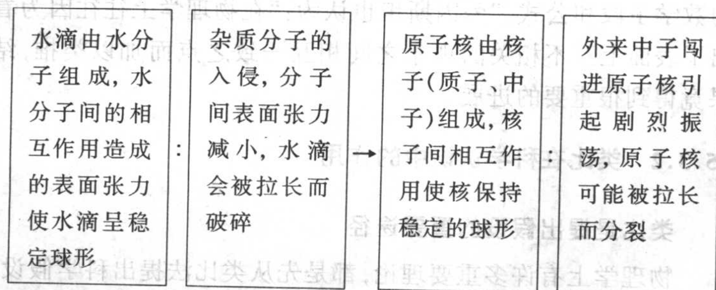
如库仑定律中电荷作用力的问题，开始是从引力作用类比过来而假想的，法国科学家普利斯特利根据实验的结果，把电荷的作用跟物体的引力作用作了类比，猜测电的作用力也遵守同一规律。这个类比假设可表示如下：



类比推理能有效激发科学家的想像

类比推理的一大特点是不拘一格，既可以近亲类比，也可以远缘类比。它允许在不知道两者之间是否有必然联系的前提下，进行一种必然的推理。因此，它能激发想像、启示联想，促进跨学科的交流、渗透和借鉴。例如，在原子核模型的建立中，弗利胥(O.R.Frish)受玻尔的影响，在原子核研究中提出的"液滴模型"的启发，把原子核想像成水滴，并从水滴的破裂想像铀核

的分裂。这个类比关系可表示如下：



弗利胥把原子核受外来中子轰击可能会分裂的情况又类比于细胞的分裂——细胞的无丝分裂是细胞核先延长，从核的中部向凹进，缢裂成两个细胞核，接着整个细胞从中部缢裂成两部分，变成两个细胞(见图 15.6)。

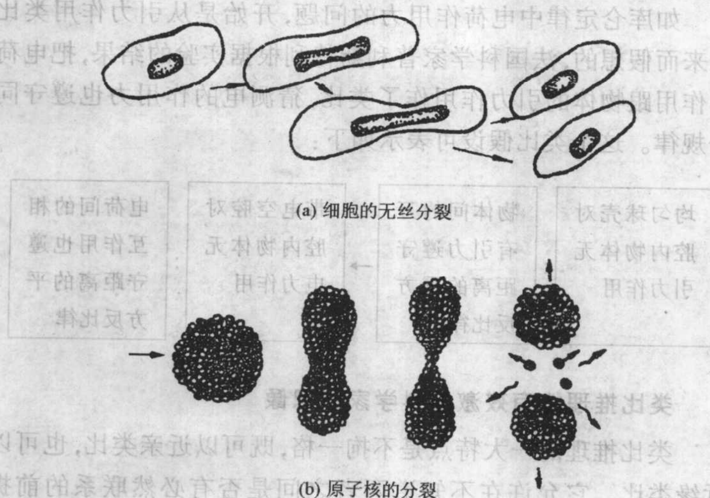


图 15.6　细胞的分裂与原子核的分裂

弗利胥是物理学家迈特纳的侄子，迈特纳对弗利胥的类比很赞赏，他们立即对裂变时释放的能量作了初步计算。迈特纳

根据铀核分裂前后的质量差和爱因斯坦质能方程算出释放的能量为200MeV，弗利胥根据液滴模型静电斥力计算的能量变化也等于200MeV，两者符合得极好。

弗利胥回到哥本哈根后，把自己与迈特纳的看法告诉玻尔。玻尔听了以后，用手敲打自己的前额惊呼："啊！我们好笨，我们以前就应该看到这一点的！"接着，弗利胥立即进行实验验证。他不仅用铀，而且用钍进行核反应，都得到相同的结果。

1939年1月16日，以迈特纳和弗利胥两人名义合写的论文"在中子轰击下重核分裂的物理证据"在英国《自然》杂志发表。他们根据与细胞分裂的类比，把这一现象称为裂变。弗利胥说："……原始的铀核逐渐变形，中间变窄，最后分成两半。这种情况与细菌繁殖的分裂过程非常相似，使我们有理由把这种现象在自己的第一篇公报中称为核分裂。"

同年1月26日，玻尔在华盛顿的第5届理论物理讨论会上宣布了重核裂变的消息，与会代表群情激奋，一下子把会议主题从原来对低温物理的讨论转到核物理上，好几位物理学家立即给自己的实验室打电话安排实验。当时，几个实验室和大学都得到了同样的结果，重核裂变的发现在几小时内就得到世界的公认。

重核裂变是人类利用能源的一个划时代的大事。

类比可导致技术上的发明创造

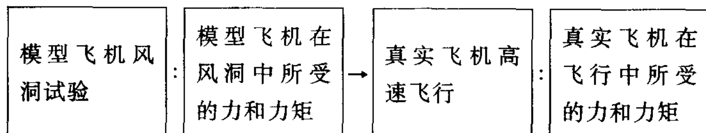
传说中国有名工匠鲁班发明锯就是受到路边茅草边缘长着锋利细齿能使人拉破手指的启发而制成的，再如望远镜类比于人们的眼睛，电话类比人的耳朵，等等，都是使人产生灵感而引发的发明。

近年来，在社会科学中引进了不少自然科学的概念模型。同样也是由类比得到启发而展开的，如企业生态学这门科学就是把企业看成是一个细胞，它有新陈代谢，它有与外界的质量、能量交换等功能，由此而建立起企业生态学的学科。

类比为模拟实验提供逻辑基础

有一种实验方法叫模拟法,这种实验研究的方法也称为模拟方法。其试验模型与原型之间只有大小比例上的不同,物理过程都是一样的。模型只不过是原型精巧的放大或缩小,就像放缩一张照片一样。

从表面上看,模拟是一种实验方法,类比是一种理论思维和推理方法,它们是不同的。但从类比和模拟的实质来看,这两种研究方法有着共同之处:类比是通过两个或两类研究对象的属性、数学形式的比较,作出它们之间的相同或相似之点的结论;模型则是以模型和原型之间的相似性,通过对模型和原型的类比,从而得出它们具有相同或相似的性质和规律的结论。如:



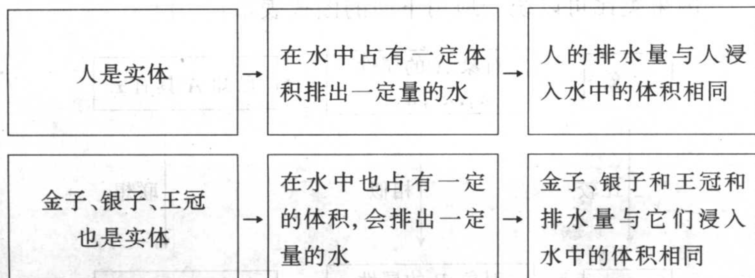
这就是说,模拟实验是以类比推理这种逻辑思维方法为理论根据的,而模拟方法则是类比方法的具体运用。

在模拟方法中,除了用实物模型作试验外,还有数学模拟。它是以模型和原型之间的数学形式的相似性为基础的实验方法。在任何两个物理过程中,只要它们所遵循的规律在数学方程上具有相同的形式,就可能用数学模拟的方法进行研究,这种数学模拟与模型类比已无明显界限。

类比的方法很多,可以从类比对象来考虑,如物理现象间的类比,跨学科现象间的类比;从方法来说,又可以按其所用方法、手段来进行类比。这里举几个例子来说明,众所周知的阿基米德原理的发现就是一个简单共存类比法。

古希腊的阿基米德面对希罗大帝(King Hiero, 269—216 BC在位)提出的判断金王冠中是否掺假的难题,一直冥思苦想

的阿基米德在一次洗澡时突然来了灵感，形成了一个简单共存类比。阿基米德从这种共存关系中找到了测量不规则形状体积的方法，从而解决了“王冠问题”。



当然，作为简单共存类比法，由于对象属性之间逻辑性联系薄弱，因此，它得到结论的可靠性也要差些。

若两个研究对象各自属性之间可能存在类似的因果联系，依此而进行的一种逻辑推理，我们称为因果类比。

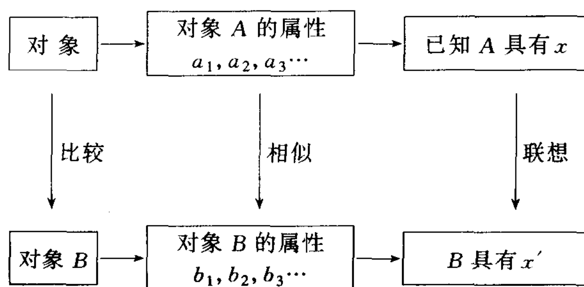


16世纪关于阿基米德的木刻(保存在巴黎国家图书馆)

如果我们用 A 和 B 分别表示两个(类)对象，用 a_1, a_2, a_3

…表示对象 A 所具有的属性，用 b_1, b_2, b_3…表示对象 B 所具有的属性，那么借助对象 A 的因果关系根据得出的事实，可类推出与它相似的对象 B 的因果关系。

因果类比可以统一地用下面的图式表示：



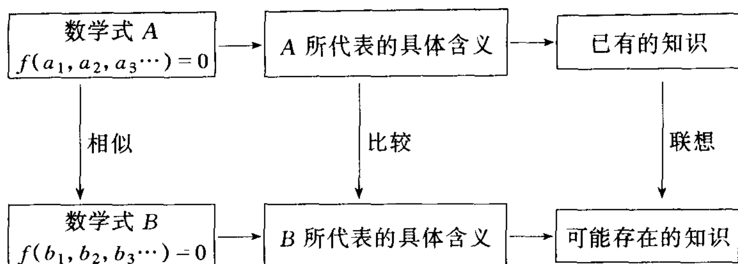
这种例子很多，如光学与声学特性的类比，安培提出分子电流的假设等都是采用了这种因果类比法。

本节中我们曾介绍库仑定律与引力定律之间的类比关系。实际上，通过实验证明：库仑定律的数学表达式$\left(F=k\dfrac{q_1q_2}{r^2}\right)$与万有引力定律的数学表达式$\left(F=G\dfrac{m_1m_2}{r^2}\right)$十分相似。因此，如果把库仑力类比于万有引力，我们就有可能把对引力的知识结构、研究方法移植到对电场的研究中，得出相应的结论。这种类比推理方法称为数学类比。

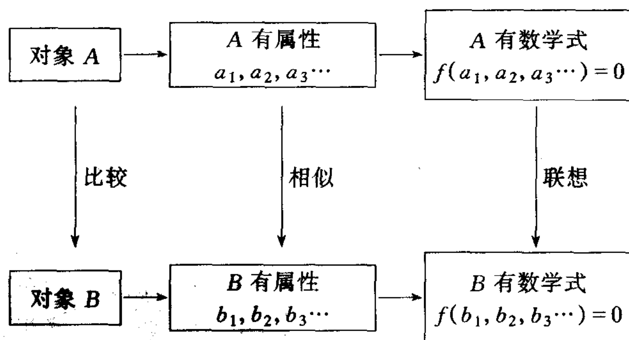
数学类比（或数学相似类比）又叫协变类比，其实质是两个数学式（或数学模型）之间，借助其他理论知识和条件的分析，从一个数学式（或数学模型）推导出另一数学式（或数学模型）及其相关的知识结论的一种类比推理方法。

数学类比可以区分为两种情况：

(1) 在两个研究对象之间，有若干相似的属性或对应量之间有相似的数学关系，借助类比，可推出它们在其他主要属性方面是相同的或相似的结论。这种数学类比可用下面的图式表示：



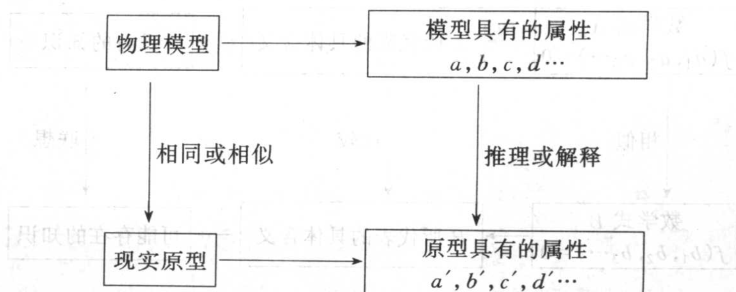
(2) 根据两个研究对象的主要属性相似，运用类比，推出它们的数学方程式在形式上也相同或相似的结论。这种类比的图式为



由于数学类比不仅是定性类比，也是定量类比，一般来说，由此得到的关于事物规律性的知识其可靠程度较高，它注重从事物的相互联系中去研究事物的各种属性之间的关系，因此，它比因果类比要更进一步。

还有一种类比叫模型类比，它是根据模型和原型客体之间具有相同或相似的关系而进行的一种类比推理，称为模型类比。

物理模型(物质模型和理想模型)是按照科学研究的需要用物质形式或思维形式对原型客体本质关系的再现，通过对模型的研究获得关于原型客体的知识，是现代科学中常用的一种思想方法。因此，这种类比推理可表示为



“物理模型”是为了便于研究而建立的高度抽象的反映事物本质特征的理想物体，人们运用“物理模型”便于计算、推理、探索物质运动的规律，建立物理方程。在构造“物理模型”时，要对复杂事物加以抽象化，突出研究对象的主要特征，在具体的过程中还要不断与实际比较，加以修正，最后达到“物理模型”与现实原型中的物理世界基本符合。

1991年诺贝尔物理学奖获得皮埃尔·吉勒·德燃纳，被人称为“当代的牛顿”。他把液晶和聚合物等复杂物质形态类比，得出了令人惊叹的简单规律。展示在读者面前的一组充满神奇的



德燃纳　　　　德燃纳在居里像前

照片，足以说明德燃纳是物理世界的类比大师。

类比对学习和研究的作用

前苏联教育家瓦赫捷罗夫曾高度评价类比推理在教学中的重大作用——“类比像闪电一样，可以照亮学生所学学科的黑暗角落”。

类比对学习和运用物理知识的指导作用，主要表现在它的发现（知识的）功能、迁移（知识的）功能、鉴别（知识的）功能和模型（实验的）功能等方面。

15.4　从原型到模型的方法

前节中我们讨论了模型类比的问题，这里再对从原型到模型的方法作些讨论。模型是理论知识的一种初级形式。做理论研究时，通常都要从“造模型”入手，对复杂事物加以抽象，简化，突出研究对象的主要特征，构成一个概念或实物体系，这就形成“模型”，从原型首先简化出来的往往只是一个“物理模型”。为了能对模型进行研究，我们还要进一步能用数学的语言，对之进行描述、计算，找出其“量”的关系和规律，也就是说“只有量化，才能深化”。这后一步的工作，也可以说是由“物理模型”上升为“数学模型”的步骤，物理学中有许多通过由原型到模型的例子。如克劳修斯提出的理想气体模型，推导出气体压强公式；范德瓦尔斯分子模型的提出，导致真实气体方程的建立；卡诺理想热机模型和理想循环的建立，导致卡诺定理的确立……从本书前几讲内容来看，这种例子是举不胜举的。

建立模型是物理学研究中常用的一种重要研究方法，它不仅可应用于形成正确理论，也有助于对各种具体现象、具体问题的研究，它可以有以下一些作用。

简化和纯化事物原型

模型是一种理想化的形态，它最明显的特点是对事物原型

加以极度的简化和纯化，摒弃其中次要的、非本质的因素，突出其主要的、本质的起决定影响的因素，并寻求与现象间的对应的“量”的关系。有时这种简化、纯化，甚至是一个思想推理过程，是逻辑推理的方法和形式，这样可以避免现实事物中的许多困难，为探索新理论提供简单可行的方法。如伽利略为说明惯性原理提出的物体在光滑斜面上下滑再上升的实验；相对论中为说明同时性所用的火车、火箭等，这些做法都牢牢地抓住了事物的本质，并能形象、生动、具体地使人们更便于热爱新思想，更容易理解新概念。

解释事物或现象的原因

模型和原型间是有一定逻辑关系，也就是从原型出发，简化、纯化成模型，对模型的研究得出了结果，结果反过来又可为解释原型提供演绎的系统。例如，利用金属导电模型来解释欧姆定律时，就是以导体中的自由电子在运动过程中频繁地与金属正离子(晶格框架)碰撞而改变运动方向，限制了定向移动速度的增加来进行解释和推导的。事实上，许多研究表明，解释事物现象原因的最终结果，往往导致假说、理论(包括物理的和其他社会科学等)的出现，尤其是假说的出现和得到证实更有实际的意义，因为假说是根据一定的科学事实和科学理论对研究中的问题所提出的假定性的看法和说明。当我们所作的由原型上升为模型的工作有成效后，进一步的演绎过程中就可以引进假定性的看法和说明。这是一种思维的升华，而它的基础就是我们从原型模型的上升和展开。例如麦克斯韦为了解释在变化磁场中导体回路上所产生的感生电流现象，提出了感生电场的假说；为了解决安培环路定律在传导电流不连续时所遇到的困难，提出的位移电流假说。这些对电磁场理论的建立都起着重要的作用。

指出方向，作出预见

由于从原型到模型的过程是排除了大量次要的、非本质、非

决定性因素的干扰和影响，而突出了其主要的、本质的、决定性的因素，因而它对现象的讨论的描述就是透过现象抓住本质，因此在研究事物时，更有助于发挥逻辑的力量，可以超越现实条件而得出更重要的结论。由于自然科学上对事物的研究往往要借助于一些手段、工具，在这些手段、工具尚未发达时，就会有暂时观察不到的现象。但是模型的力量往往会领先于这些实际手段、实际工具的观察而能作出科学的预见，例如：海王星的发现是勒维列"用笔和纸"发现的，他没有向天空看过一眼。

这种假说的方法，还有一种做法，这就是按原有的理论去展开讨论，使之得出矛盾的结果，再动摇原有理论的基础，这就是所谓的"佯谬法"，如爱因斯坦的"追光悖论"，伽利略的"落体佯谬"以及物理学中的其他的"悖论"、"佯谬"都是非常有趣和有效的。

当然，在实际的科学发现中，并不存在什么十分严格的逻辑通路，科学的创造常常是由于科学家们独特的创造性思维的结果。作为物理课的学习，我们不应只强调教授前人的研究成果，而对于前人如何得到这些成果的思路和研究方法却很少提到。中国有句古语叫："授人以鱼，不如授人以渔。"从教学来说，"授人以鱼"的教学，则远不如"授人以渔"的教学。法国物理学家拉普拉斯说："认识一位巨人的研究方法，对于科学的进步……并不比发现本身更少用处，科学研究的方法通常是极富兴趣的部分。"为此，本书特别安排了本讲的内容，以供学习、参考。

复习思考题与习题

·1·

1. 从人类在自然界中的时、空地位来讨论人类对自然界认识的辩证关系。

2. 你对人类在现实社会中的地位及其与周围的关系是如何看待的?

·2·

1. 从西方中世纪宗教势力的专横与亚里士多德经院主义哲学体系对科学禁锢中,你得到哪些认识和启迪?

2. 悖论在科学发展中起了什么作用? 请列举几个悖论的例子来。

3. 理想实验的思辨的特点如何?

4. 从牛顿力学的发展及其哲学思考中,对你有何启示?

·3·

1. 什么叫质点? 一个物体可以抽象地定义为质点的物理条件是什么? 试举例说明之。

2. 什么叫参考系? 哪些物体(或系统)可以选为参考系? 描写一个物体的运动,可以选取几个参考系? 怎样选取参考系为宜? 试举例说明之。

3. 试写出一个质点在三维直角坐标系位置的矢量表示式。它还能采用其他表示形式吗? 试举例说明之。

4. 何谓一质点运动的平均速度? 何谓一质点运动的瞬时速度? 一个物体在做何种类型的运动时,这两种速度总是相等?

5. 何谓一质点运动的平均加速度? 何谓一质点运动的瞬时加速度? 一个物体在作何种类型的运动时,这两种加速度总是相等?

6. 在某一时刻物体的速度很大,在该时刻它的加速度是否也一定很大? 反之,如果在某一时刻它的加速度很大,在该时刻它的速度是否也一定很大?

7. 一个质点运动的方向(即速度的方向)和加速度的方向在什么情况下恒为一致? 在什么情况下并不一致? 试举例说明之。

8．已知质点的位置矢量函数，通过什么数学步骤可求出质点在各时刻的速度与加速度？反之，若质点的加速度已知，通过什么数学步骤可求出质点在各时刻的位置及速度？其条件是什么？

9．分析质点的圆周运动时，可用线量（如位移、速度、加速度）或角量（角位移、角速度、角加速度）来描述，它们之间有何关系？

10．何谓运动学问题？何谓动力学问题？动力学的基本原理是什么？

11．什么叫惯性？为什么说物体的惯性是物体自身的一种性质？何谓物体的惯性质量？何谓惯性定律？

12．何谓力？为什么说世界上没有抽象的力，它只是运动转移的表现及度量？

13．何谓作用力和反作用力？它们之间有何关系？这种关系反映了物体世界的一种什么样的普遍性质？

14．物体在力 F 作用下作匀速直线运动，如果力 F 逐渐减小，那么物体的速度和加速度将怎样改变？（课堂讨论题）

15．牛顿第二运动定律有哪几种数学表示形式？哪种形式适用范围更广？为什么？

16．牛顿第二运动定律与机械决定论有何关系？试以太阳系的天体运行为例说明之。对机械决定论应如何评价？

17．牛顿三个定律之间有何关系？各占什么地位？

18．伽利略是怎样论证落体定律的？传说中的比萨斜塔实验可靠吗？

19．从伽利略给出匀加速运动的最初定义，到最后肯定他的定义同实际观察到的自由下落运动相符合，举出他的步骤。他的论证中包括了哪些限制条件和理想化？使用了哪些特殊的方法？

20．有人说："伽利略之所以成为近代科学之父，是由于他以经验的、实验的方法来代替思辨的、演绎的方法。"你认为这种理解对吗？

21．牛顿是在吸取了他的前辈和同时代人的哪些物理思想后创立经典力学的？

22．功的定义是什么？正功、负功、零功分别表示哪三种实际情况？试举例说明之。

23．功率的定义是什么？何谓平均功率？何谓瞬时功率？在什么情况下，平均功率与瞬时功率恒为一致？

24．何谓保守力？何谓耗散力？试举例说明之。

25．何谓物体的能量？何谓物体的动能？

26. 何谓势能？为什么说势能不属于孤立物体，而是属于系统的？试举例说明之。

27. 何谓功能定理？其意义如何？为什么说能量表示运动转化的可能性，而功表示运动转化的现实性？

28. 何谓机械能？机械能守恒有何条件？（课堂讨论题）

29. 单摆运动过程中动能与势能是如何相互转化的？（课堂讨论题）

30. 何谓动量？何谓冲量？动量定理是如何叙述的？其意义如何？

31. 在什么条件下，动量守恒？（课堂讨论题）

32. 为什么说动量定理和动能定理可理解为牛顿第二运动定律的推广？作了这样的推广后，有何好处？（课堂讨论题）

33. 机械运动有哪两种量度？它们有何区别？

34. 什么叫刚体？一个物体可以抽象地定义为刚体的条件是什么？试举例说明之。

35. 刚体定轴转动为何用角量来描述？

36. 力矩是什么？如果一个刚体所受合外力为零，其合力矩是否也一定为零？如果刚体所受外力矩为零，其合外力也一定为零吗？举例说明。

37. 在某一瞬间，物体在力矩作用下其角速度可以为零吗？其角加速度可以为零吗？

38. 如果系统的动量守恒，试问角动量是否也守恒？动能是否也守恒？机械能是否也守恒？能量是否也守恒？结合具体例子加以讨论。（课堂讨论题）

39. 用类比的方法，讨论质点运动和刚体定轴运动的异同。

40. 质量为0.5 kg，长为0.4 m的均匀细棒，可绕垂直于棒的一端的水平轴转动，如将此棒放在水平位置，然后任其下落，求：(1) 当棒转过60°时的角加速度和角速度；(2) 下落到竖直位置时的动能；(3) 下落到竖直位置时的角速度。

41. 何谓角动量？何谓力矩？角动量定理是如何叙述的？它与动量定理有何对应关系？

42. 在什么条件下，角动量守恒？

43. 何谓对称性？能量守恒对应着哪种对称性？动量守恒对应着哪种对称性？角动量守恒对应着哪种对称性？为什么从牛顿定律导出的守恒定律比牛顿定律适用范围广泛得多？

44. 试根据机械运动的特点及规律说明：运动是绝对的，而静止是相

对的;转化是绝对的,而守恒是相对的。

45. 机械运动有几种形式? 各是什么特征?

46. 何谓振动? 何谓简谐振动? 描述简谐振动的特征需要哪几个物理量? 各代表什么物理意义?

47. 机械波是如何形成的? 何谓横波? 何谓纵波? 试举例说明之。

48. 波动与振动之间有什么关系? 何谓简谐波? 复杂波与简谐波之间有何关系?

49. 何谓惠更斯原理? 何谓波的干涉? 何谓波的衍射? 干涉与衍射之间有何关系?

50. 何谓多普勒效应? 试举例说明之。如何利用光学多普勒效应来判断天体的运动情况?

51. 位置矢量和位移有何区别?有何关系?怎样选取坐标原点才能使二者一致?在式 $\bar{v} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta \bar{r}}{\Delta t} = \dfrac{\mathrm{d}\bar{r}}{\mathrm{d}t}$ 中哪一个是位移矢量?哪一个是位移?

52. 在竖直上抛中有公式,$s = v_0 t - \dfrac{1}{2}gt^2$,$s$ 是路程还是位移?有人沿半径为 R 的圆形跑道跑了半圈,他所经的路程和位移的大小各是多少?

53. 已知一质点在作匀加速运动,请判别下列几种说法是否正确。

(1) 质点一定作轨迹为直线的运动。 ( )

(2) 质点作匀速率圆周运动。 ( )

(3) 质点作变速圆周运动。 ( )

(4) 质点作各种类型的抛体运动。 ( )

理由是:____________________。

54. 回答下列三个问题:(1) 匀加速运动是否一定是直线运动? (2) 在变速圆周运动中,加速度的方向是指向圆心吗? (3) 当物体的加速度为零时,物体在作怎样的运动?

55. 设质点的运动方程为 $x = x(t)$, $y = y(t)$, 在计算质点速度、加速度时,有人先求出 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$,然后根据 $v = \dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}$, $a = \dfrac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2}$ 而求得结果;又有人先计算速度、加速度分量,再合成求得结果,即 $v = \sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \left(\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2}$, $a = \sqrt{\left(\dfrac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}\right)^2 + \left(\dfrac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}\right)^2}$。你认为这两种方法中哪一种正确?为什么?

56. 请判断下列说法是否正确。

(1) 合外力等于零,物体的速度一定等于零。 ( )

(2) 合外力不等于零,物体的速度不可能为零。 (　　)

(3) 合外力不等于零,物体的速度大小一定变化。 (　　)

(4) 合外力不等于零,物体的速度矢量一定变化。 (　　)

57. 物体在力 $\boldsymbol{F}$ 作用下作匀加直线运动,如果力 $\boldsymbol{F}$ 逐渐减小,那么物体的速度和加速度将怎样改变?

58. 回答下列问题:(1) 物体受到几个力作用时,是否一定产生加速度?(2) 力的独立性原理肯定每个力都产生与之相应的加速度,这和(1)有无矛盾?(3) 物体的速度很大是否都意味着其他物体对它作用的合外力也一定很大?(4) 物体运动的方向一定和合外力的方向相同,对不对?(5) 物体作圆周运动时,如果它的速率保持不变,它所受的合外力是否也保持不变?

59. 功的表达式如果写成下列三种形式:

(1) $Fs\cos\theta$;

(2) $(F\cos\theta)s$;

(3) $F(s\cos\theta)$。

用这些数字语言表达功的概念可以吗?为什么?

60. "作用力的功与反作用力的功总是大小相等而符号相反",对吗?为什么?

61. 设有两个质量相等的物体,一个竖直上抛,另一个斜向上抛,初动能相同,问到达最高点时,动能是否相同?势能(相对于地面)是否相同?

62. 在光滑的桌面上放着一块质量为 M 的木块,质量为 m 的子弹以速度 v_0 水平向木块射去,穿出木块时的速度为 v,木块获得速度 v,问在此过程中:(1) 子弹动能减少了 $\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}mv^2$;(2) 子弹的动能减少了 $\frac{1}{2}Mv^2$;(3) 总机械能减少了 $\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}Mv^2$;(4) 木块的动能增加了 $\frac{1}{2}Mv^2$。以上结论哪些是正确的?

63. 要把钉子钉在木板上,挥锤击打容易钉进,而用锤压钉则很难压进,这是为什么?

64. 有一盏可看成为点光源的灯,灯下站着一个人,设人的高度为 h,从地面到灯的距离为 H,问:(1) 当人以速度 v 作匀速水平运动时,他的头的影子作什么运动?(2) 当人加速向前行走时,头的影子的加速度与人的加速度相同吗?

65. 对于质量相同的两个物体,下面的结论哪个是正确的?

(1) 两者动能相等,则二者动量必相等;

(2) 两者动量相等,则二者动能必相等;

(3) 两者动能相等,则二者速度比相等。

66. 在相同的弹簧上分别挂着质量不同的球,使之震动后,问周期相同否?

67. 一个单摆的摆球在最左端,正在开始向右运动(振动位移方程用余弦函数表示)问这时的初相位是多少?

68. 请为宇宙飞行员设计一个用实验方法测体重的装置。(请不要用课堂上讲过的例子)

69. (1) $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta \bar{v}}{\Delta t}=0$ 的运动是什么运动?(2) $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta v}{\Delta t}=0$ 的运动是什么运动?

70. 一物体从某一确定高度以 H 处 v_0 的速度水平抛出,已知它落地时的速度为 v_t,那么物体运动的时间为多少?

71. 有一物体,以速度 v_0 在光滑水平面上运动,当它受到一个大小不变的水平力 F 作用时,在下述各种情况下,物体将作什么运动?

(1) F 与 v_0 同向;

(2) F 与 v_0 反向;

(3) F 与 v_0 始终保持垂直;

(4) F 与 v_0 的夹角为锐角;

(5) F 与 v_0 的夹角为钝角。

72. 已知质点的运动方程为:$x=2t, y=2-t^2$(长度 x、y 以 m 为单位,时间 t 以 s 为单位)。

(1) 计算并图示质点运动的轨道;

(2) 求 1 s 末和 10 s 末的瞬时速度与瞬时加速度;

(3) 求起始时刻到 10 s 末的平均速率。

73. 有一物体作直线运动,它的运动方程为:$x=6t^2-2t$。试求:

(1) 2 s 时间内的平均速率;

(2) 第 3 s 末的速度;

(3) 第 1 s 末的加速度。

74. 已知质点的运动方程为:$\boldsymbol{r}=a(\cos\omega t)\boldsymbol{i}+a(\sin\omega t)\boldsymbol{j}$,

(1) 试求质点的速度与加速度;

(2) 试求运动的轨迹方程。

75. 设有一粒子从原点以初速度 v 沿与水平 Ox 轴成 α 角的方向发射,

试分别求出：

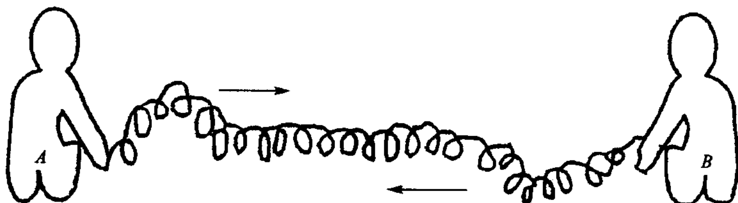
(1) 任意时刻的速度和位置在 x、y 轴上的坐标分量；

(2) 证明粒子运动轨迹方程为 $y = x\tan\alpha - \dfrac{g}{2v_0^2\cos^2\alpha}x^2$

76. 设有一只小白兔向一棵大白菜跑去，若小白兔每秒钟所走距离是从自身到大白菜的剩余距离的一半。问兔子第 1 s、第 2 s、…、第 n s 内的平均值各为多少？兔子什么时候可跑到大白菜处？按整个时间间隔（从起始到跑到大白菜处）计算，兔子的平均速度的极限是多少？

77. 设火箭信管的燃烧时间为 6 s，今在与水平方向成 45° 角的方向将火箭发射出去。欲使火箭在弹道的最高点爆炸，问必须以多大初速度发射火箭（课堂讨论题）。

78. 有个长弹簧绳，左右两端同时送出一个大小相等的脉冲波。如图所示，问哪个答案是正确的？



(1) A 的波经过一段时间后还返回到 A 处；B 的波经过一段后还返回到 B 处。

(2) A、B 两波在中间处抵消。

(3) A 的波经过一定的时间到达 B，B 的波经过一定时间到达 A。

79. 请在下面这一组图形符号中，找出它们所蕴含的内在规律然后在方框中填上恰当的图形。



80. 若有人能将苹果皮从上到下连续不断的削下来，如图所示。现问：

(1) 若将苹果认为是一个理想的球体，问水平方向从上向下削下的苹果皮留在苹果上时，它对于过球心的水平面是否是平面对称的？

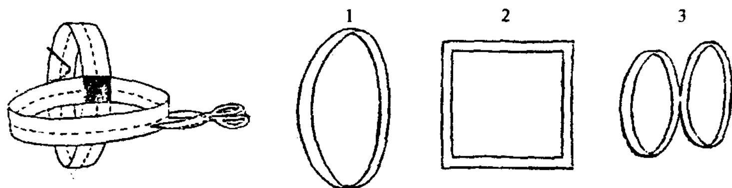
(2) 若将苹果皮摊开平放时，它是 1、2、3 的哪一种形状？

(3) 能否将(2)问中的答案用参数方程表示出来？



81. 有一玩具是由一块质量为 m_1 的板和一个质量为 m_2 的闭合空腔体通过弹簧连成(劲度系数为 k),弹簧上有吸盘,人工吸牢后瞬时放开,使该玩具跳起。观察该玩具,以此设计出一道习题来,并作出解答。

82. 日常生活中的知识题。若有两个纸圈粘在一起,沿虚线剪开两圈后得的形状如何?(着重讲你的思考方法)



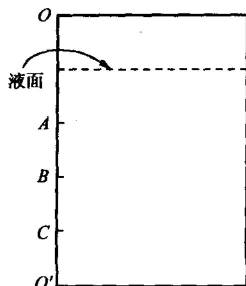
83. 有人说"平抛物体在空间运动的时间总是跟同样高度的自由落体运动的时间相等,与抛出去的初速度无关"。这句话对吗?为什么?

84. 有两个同样的物体,从某一建筑物的同一地点下落,其中一个自由下落,另一个沿斜面无摩擦下滑。

(1) 两个物体能否同时到达地面?

(2) 在下落过程中,两者的加速度是否相同?

(3) 两者落到地面时的速率是否相等?



85. 容积为 1 L 装的牛奶盒一个,其中牛奶的高度 OO' 为 20 cm,现在其不同的水平位置上分别开三个洞,$O'C = 5$ cm,$O'B = 10$ cm,$O'A = 15$ cm。

(1) 若将其放在水平桌面上,同时打开洞

口,牛奶喷出的轨迹如何?为什么?(用计算式和用文字来证明)

(2) 若将该牛奶盒自由落体坠下,则牛奶喷出的轨迹有什么变化?为什么?(可参考中学已学过知识回答)

·4·

1. 何谓系统?何谓系统的状态?何谓状态方程?何谓环境?环境与系统是什么关系?

2. 理想气体状态方程

$$pV=\frac{M}{\mu}RT$$

在什么条件下,可分别过渡为:

(1) 玻意耳定律;

(2) 盖吕萨克定律;

(3) 查理定律。

3. 何谓内能?改变内能通常有哪两种方式?

4. 热力学第一定律的数学形式是怎样的?它的实质意义是什么?为什么说第一类永动机是不可能创造出来的?

5. 何谓等容、等压、等温、绝热过程?试述这些过程的热力学性质。

6. 卡诺热机是由哪几个过程构成的?它的效率由哪些因素决定?

7. 何谓热力学第二定律的克氏说法?何谓热力学第二定律的开氏说法?热力学第二定律的实质何在?为什么说第二类永动机是不可能创造出来的?

8. 何谓一个系统的宏观状态?何谓一个系统所包含着的微观状态?宏观状态的热力学几率是什么?

9. 何谓热力学系统的熵?它与系统的热力学几率是何关系?

10. 引入熵的概念后,热力学第二定律如何表述?

11. 何谓“热寂论”?为什么说“热寂论”是没有科学根据的?

12. 试以热运动的特点及规律为例,说明以下概念的辩证关系:

(1) 宏观与微观;(2) 偶然与必然;(3) 平衡与非平衡;(4) 有序与无序;(5) 转化与守恒;(6) 可逆与不可逆;(7) 孤立与开放。

13. 何谓涨落?试举例说明之。如何从微观过程来解释涨落现象?

14. 统计规律与动力学规律相比有哪些特点?能够把统计规律性归结为动力学规律吗?对统计性规律的揭示与认识在哲学上有何意义?

15. 什么是信息？信息量是怎样定义的？信息与熵有什么关系？

16. 有一端封闭的长 $L = 0.7$ m 的细玻璃管竖直放置，开口端向上。今向其中注入水银，注入过程中，少许空气外逸。管内水银柱高 $h = 0.2$ m 时，水银面恰与管顶相齐，用手指将管口封住，将管轻轻倒转。再到竖直位置时，放开手指，这时有部分水银泄出。若空气温度不变，大气压为 $p = 9.98 \times 10^4$ Pa，问留在管内的水银柱的长度是多少？

17. 水银气压计中混进了一个气泡，因此它的读数比实际的气压小些。当精确的气压计的水银柱为 0.768 m 时，它的水银柱只有 0.748 m 高，此时管中水银面到管顶的距离为0.08 m。试问此气压计的水银柱为 0.734 m 高时，实际的气压应是多少？（把空气当作理想气体，并设温度不变）。

18. 在容积为 V 的容器中盛有被试验的气体，其压强为 p_1，称得重量为 G_1。然后放掉一部分气体，气体的压强降至 p_2，再称得重量减至 G_2。问在 1 个大气压下，气体的密度是多大？

19. 自行车轮直径为 71.21 cm，内胎截面直径为 3 cm。在 3℃ 的空气里向空胎里打气。打气筒长 30 cm，截面半径 1.5 cm。打了 20 下，气打足了，问此时胎内气体压强是多少？设车胎内最后气体温度为 7℃。

20. 一热气球的容积为 2200 m^3，气球本身和负载质量共 725 kg。若其外部空气温度为 20℃，要想使气球上升，其内部空气最低要加热到多少摄氏度？

21. 某柴油机的气缸充满空气，压缩前其中空气的温度为 47℃，压力为 8.61×10^4Pa。当活塞急剧上升时，可把空气压缩到原体积的 1/17，其时压力增大到 4.25×10^6Pa，求这时空气的温度。（分别用 K 和℃表示）。

22. 一氢气球在 20℃ 充气后，压力为 1.2×10^5Pa，半径为 1.5 m。到夜晚时，温度降为 10℃，气球半径缩为 1.4 m，其中氢气压力减为 1.1×10^5Pa。求已经漏掉了多少氢气。

23. 举例叙述几种能量间相互转化的转换工程的原理与装置。

·5·

1. 何谓“可逆”？何谓“不可逆”？

2. 熵的深化和发展对你有何启示？

3. 什么是耗散结构系统。举例说明之。

4. 在耗散结构系统中，熵的变化情况如何？

5. 负熵的意义何在?

6. 如何理解“麦克斯韦妖”?

·6·

1. 法拉第的力线模型和场的概念是怎样形成的? 电磁场的“以太”假说在历史上有何进步意义和局限性?

2. 法拉第对电磁感应的探索是受了哪些因素的推动? 在什么条件下提出来的? 为什么安培等人的探索失败了,而法拉第获得了成功?

3. 麦克斯韦关于感生电场和位移电流的概念是怎样提出来的?

4. 为什么要引入电场强度 E 和电势 V 来描述电场? 如何计算电场强度和电势这两个物理量?

5. 电场线和等势面是如何定义的? 引入电场线和等势面有何意义?

6. 任意两根电场线能相交吗? 为什么? 任意两个等势面能相交吗? 为什么?

7. 何谓静电场中的高斯定理和环路定理? 它们反映静电场具有何种性质?

8. 为什么引入磁感应强度 B 来描述磁场? 如何计算磁感应强度?

9. 磁感应线是如何定义的? 它与电场线有什么不同?

10. 何谓稳恒磁场中的高斯定理和安培环路定理? 它们反映稳恒磁场具有何种性质?

11. 试讨论一个质量为 m 带电量为 q 的带电粒子以速度 v 进入均匀电场 E 或均匀磁场(磁感应强度为 B)后,可能出现的运动轨迹。(课堂讨论)

12. 两个均匀带电同心球面,内球面带有电荷 q_1,外球面带有电荷 q_2。两球面之间距球心为 r 处的电场强度为 $\frac{3\times10^3}{r^2}\mathrm{N\cdot C^{-1}}$,方向沿球面半径指向球心;外球面之外距球心为 R 处的电场强度为 $\frac{2\times10^3}{R^2}\mathrm{N\cdot C^{-1}}$,方向沿球面半径向外。求 q_1 和 q_2 各等于多少?

13. 实验证明,地球表面上方电场不为 0,晴天时大气电场的平均电场强度约为 $120\ \mathrm{V\cdot m^{-1}}$,方向向下,这意味着地球表面上有多少过剩电荷? 试以每平方厘米的额外电子数来表示。

14. 平行放置且相距 0.2 m 的两个无限大均匀带电平面,面电荷密度分别为 $\sigma_1=4\times10^{-11}\mathrm{C\cdot m^{-2}}$和 $\sigma_2=-2\times10^{-11}\mathrm{C\cdot m^{-2}}$。求:(1) 此系统的

电场分布;(2) 距正带电平面 0.05 m 处的电势。(设负带电平面电势为零)

15. 试计算载有电流为 I 的无限长直导线周围的磁感强度?

16. 如何说明电场、磁场的物质性?

17. 为什么说麦克斯韦方程是经典电磁场理论中的基本方程。

18. 试以人类对电磁现象认识的发展历史,说明实验与理论在人类认识中的关系。

19. 下述关于某点电势正负的叙述,哪一条是正确的?

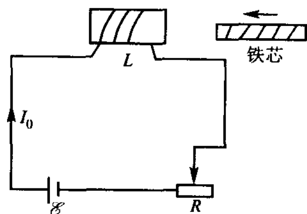
(1) 电势的正负,决定于试探电荷的正负;

(2) 电势的正负,决定于外力对试探电荷作功的正负;

(3) 某点电势的正负是不一定的,决定于电势零点的选择;

(4) 电势的正负决定于带电体所带电荷的正负,带正电荷的物体形成的电场中的场点电势为正,反之为负。

20. 电源 $\mathscr{E}$,可变电阻 R 和螺线管 L,如图所示,串联成闭合电路。据此,下边的说法哪一条是正确的?



(1) 可变电阻触点向左滑,或铁芯插向螺线管时,有感生电流 I' 产生,方向与 I_0 相反。

(2) 将螺线管的截面压成扁圆形的过程中,有感生电流 I' 产生,方向与 I_0 相反。

(3) 将螺线管的长度压短的过程中,产生的感生电流 I' 其方向与 I_0 相反。

21. 由于现代科技发展和人民生活的需要,有很多电台在发射电磁波,所以空间充满着电磁波。然而在远古时代,甚至人类还没有的恐龙时代,那时空间也有电磁波传播吗? 为什么?

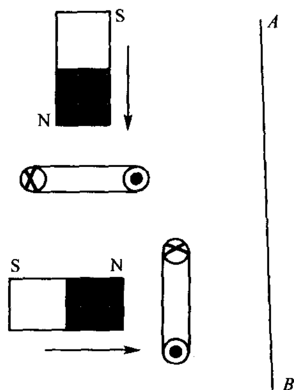
答案为:(1) 除了打雷时有外,其他时候没有;(2) 有;(3) 没有。

请选择,并作解释。

22. 若有一平面镜 AB,当两磁铁如图方向运动时,请画出镜中磁铁、电流相应的运动方向。认真考虑,并作讨论。

提示:请分别画出以下的方向:

(1) 磁铁运动;(2) 线圈有电流流过;(3) 电磁感应现象。



·7·

1. 你认为电子工程当前应如何发展?
2. 简述计算机主要部件的主要功能及计算机基本工作原理。
3. 当前计算机主要应用在哪些方面:请举一二个实例来说明。
4. 请举例说明互联网与社会的密切关系。

·8·

1. 何谓牛顿的绝对时空观? 相对论的时空观与它有何"质"的不同?

2. 迈克耳孙实验在建立狭义相对论中的意义何在? 有人说"它是相对论赖以产生的判决性实验。"你认为这种理解对吗?

3. 爱因斯坦的相对论与洛伦兹变换理论和庞加莱的"相对性原理"有何不同? 他们的物理思想有何差异?

4. 利用麦克斯韦方程处理运动物体的电磁现象遇到了哪些问题? 其原因何在?

5. 相对论中的质量、动量、动能、总能量、静止能量各如何表示? 为使牛顿力学符合相对论效应,牛顿力学有关公式应如何修正?

6. 广义相对论有哪两条基本假设? 它是怎样提出来的?

7. 广义相对论对牛顿力学的惯性系概念作了哪些修正? 两者有何不同?

8. 广义相对论有哪些效应? 被证实情况如何?

9. 大爆炸宇宙学是怎样提出的? 被证实情况如何?

10. 19世纪末叶热辐射研究是在什么背景下兴起的？经典辐射理论遇到了哪些困难？普朗克研究热辐射的动机是什么？有哪些事实说明对普适规律的追求是他的科学目标和力量的源泉？他对热辐射的研究有何特色？

11. 经典理论在解释光电效应时遇到了哪些困难？爱因斯坦是怎样提出光子假设来解决这些困难的？光的波粒二象性概念是怎样形成的？

12. 康普顿散射理论在量子论的发展中有何重要意义？

13. 玻尔的氢原子理论是建立在哪些理论和实验事实的基础上的？他的定态概念和量子假设是怎样提出来的？玻尔理论对原子结构的量子理论作出了哪些重要贡献？它存在哪些缺陷？遇到哪些困难？

14. 何谓德布罗意公式？如何用实验验证它？

15. 何谓不确定关系？其意义如何？

16. 何谓德布罗意波？它描写的是什么样的粒子？

17. 波函数的统计解释的内容如何？

18. 何谓薛定谔方程？它在微观粒子运动中的地位如何？与牛顿方程比较之。

19. 关于量子运动的几率性质，有哪几种不同的观点？

20. 试比较微观粒子与宏观粒子的运动，指出它们的异同。

21. 从量子论的建立及发展，说明人类认识发展的规律性。

22. 下列几种发光形式是不是热辐射？

(1) 霓虹灯发的光；(2) 日光灯发的光；(3) 钠光灯发的光；(4) 荧光和磷光。

23. 炼钢工人凭观察炼钢炉内的颜色就可以估计炉内的温度，这是根据什么道理？

24. 在光电效应实验中，如果：(1) 入射光强度增加一倍；(2) 入射光频率增加一倍。各对实验结果有什么影响？

25. 用一定波长的光照射金属表面产生光电效应时，为什么逸出金属表面的光电子的速度大小不同？

26. 在通常实验中，为什么不用可见光来观察康普顿效应？

27. 光电效应和康普顿效应都包含有电子与光子的相互作用过程，下面哪种说明是正确的？

(1) 两种效应都属于电子与光子的弹性碰撞过程；

(2) 光电效应是由于电子吸收光子能量而产生的。而康普顿效应是

由于光电子与电子的弹性碰撞而产生的；

(3) 两种效应都服从动量守恒定律与能量守恒定律。

·9·

1. 为什么说材料科学是科学创新的基础？

2. 环境保护与材料科学有何联系？

3. 能源工业与材料科学有何关系？

4. 信息技术与材料科学关系如何？

5. 你对材料科学的发展有何希望？

6. 为什么说新世纪对材料科学提出了挑战和期望？按照你的理解其重点主要在何处？

·10·

1. 原子核是由于哪些粒子组成的？核力有哪些性质？

2. 何谓放射性元素？何谓放射性衰变规律？

3. 何谓原子核的结合能？何谓重核的裂变？何谓轻核的聚变？这些反应得以产生的物理原因何在？

4. 基本粒子可分哪几类？分类的根据是什么？

5. 基本粒子之间有哪几种类型的相互作用？其基本特性有哪些？

6. 基本粒子如何相互转化？受什么条件限制？

7. 粒子与场之间的关系如何理解？

8. 夸克粒子模型是怎样提出来的？夸克共有多少种？它有哪些量子特征量度？

9. 何谓夸克的“味道”？何谓夸克的“颜色”？它们之间有何关系？

10. 夸克粒子之间的相互作用有何特点？

11. 为什么至今尚未发现自由夸克存在？对此有哪几种解释？

12. 夸克是怎样组成介子及重子的？试举例说明之。

13. 何谓轻子谱与层子谱？这些谱的存在意味着什么？在物理学历史发展上，有哪些类似情况？

14. 按照现代物理学的观点，物质存在哪几种基本形态？各有什么特点？它们如何相互联系、相互制约组成物理世界的？

15. 按照现代物理学的观点，物质世界有哪几种相互作用？它们之间如何统一？

16. 从粒子的结构及相互作用的角度阐明物质世界是如何统一的。

17. 试阐述无生命物质世界的层次，各层次的特点，各层次间的关系。

·12·

1. 什么是分形？分形有什么特点？

2. 分数维是什么？为何求？

3. 分形的数学定义是怎样叙述的？

4. 叙述社会分形与自然分形的相关和区别。

5. 如何理解分形中的自相似性？

6. 如何表征“经济弹性”？

·13·

1. 从物质到生命的过程是怎样衍变的？

2. 什么是“遗传基因”？如何描述它？

3. 染色体是什么？

4. 从维多利亚女皇的血友病的遗传，反思一下生物科学的发展历程及其对我们的启示。

5. 叙述一下生物技术的发展并展望其未来。

6. 为什么说 21 世纪科技发展的新趋势是生物—物理的大融合？

7. 你对 Bio-x 的认识如何？

·14·

1. 从物理现象的非物理思考你得到了怎样的教育？

2. 对非物理事件的物理思考，你得到了什么收获？

·15·

1. 常见的物理学的主要研究方法有哪些？

2. 试用一个物理学的伟大发明，说明这些方法的应用过程。

3. 试叙述你在实际生活、学习中应用这几种方法的实例，或叙述本课程中的研究方法在其他课程中的渗透、应用的实例。

参考书目

1 钱时惕.物理学及现代科技概论.高等教育出版社,1990
2 王溢然.猜想与假设.河南教育出版社,1994
3 岳燕宁.分析与综合.河南教育出版社,1994
4 倪光炯,李洪芳.近代物理.上海科技出版社,1990
5 王溢然,张耀久.类比.河南教育出版社,1994
6 郭奕玲等.近代物理发展中的著名实验.湖南教育出版社,1990
7 〔日〕广濑立成.现代物理への招待.培风馆,1993
8 〔日〕田沼静一.エネルギ——变换.裳华房,1992
9 〔日〕丹生庆四郎.エネルギ——工学.放送大学教育,1994
10 王溢然.模型.河南教育出版社,1994
11 薛瑞丰等.物理学史的启迪.西北工业大学出版社,1998
12 程守洙,江之永等.普通物理学.人民教育出版社,1976
13 〔美〕V.F.韦斯科夫.人类认识的自然界.科学出版社,1975
14 李元杰.寻找上帝的科学.湖北人民出版社,2000
15 王彬.熵与信息.西北工业大学出版社,1994
16 倪光炯等.改变世界的物理学.复旦大学出版社,1994
17 林鸿溢,李映雪.分形论——奇异性探索.北京理工大学出版社,1992
18 刘佑昌.现代物理思想渊源——物理思想纵横谈.北京航空航天大学出版社,1995
19 〔美〕L.史莱因.艺术与物理学——时空和光的艺术观与物理观,吉林人民出版社,2001
20 李剑君,陈子丰.厚积薄发——朱棣文科学风采.上海科技教育出版社,2001
21 赵玉芬,赵国辉.生命的起源与进化,科学技术文献出版社,1999
22 〔日〕山形正男(编集人).情报·知识 Imidas.2001,集英社,2002
23 〔英〕约翰·巴罗.艺术与宇宙.舒运祥译,上海科学技术出版社,2001
24 〔日〕高须雅.力学レクチヤー.学术图书出版社,1996
25 〔日〕小林幸夫.力学ステーショソ.森北出版社,1997